

# **MÉMOIRE DE MAÎTRISE**

## **ÉTUDE COMPARATIVE DES PERFORMANCES D'UN SYSTÈME MANUFACTURIER CELLULAIRE DYNAMIQUE**

soumis au département de  
Génie Industriel

par  
Yannick Marcoux

comme exigence partielle  
dans le cadre d'une Maîtrise Scientifique en Sciences Appliquées  
Génie Industriel Option Productique

Novembre 2003

Université du Québec à Trois-Rivières

Service de la bibliothèque

Avertissement

L'auteur de ce mémoire ou de cette thèse a autorisé l'Université du Québec à Trois-Rivières à diffuser, à des fins non lucratives, une copie de son mémoire ou de sa thèse.

Cette diffusion n'entraîne pas une renonciation de la part de l'auteur à ses droits de propriété intellectuelle, incluant le droit d'auteur, sur ce mémoire ou cette thèse. Notamment, la reproduction ou la publication de la totalité ou d'une partie importante de ce mémoire ou de cette thèse requiert son autorisation.

## **SOMMAIRE**

Ce mémoire présente une analyse comparative des systèmes manufacturiers cellulaires dynamiques par rapport aux ateliers spécialisés et aux cellules classiques soumis à divers degrés de turbulence de la demande.

L'expérimentation compte 13 variables indépendantes dont plusieurs portent spécifiquement sur la nature turbulente de la demande, et 17 mesures de performances (variables réponses). Un modèle de simulation développé sur Microsoft Visual FoxPro 5.0 a été utilisé en boucle fermée en interface avec le logiciel d'optimisation linéaire LINDO version industrielle afin d'obtenir les résultats bruts. Un plan Taguchi a été utilisé étant donné le grand nombre de variables et le temps considérable de résolution par LINDO.

L'analyse des résultats selon la méthode ANOVA tend à démontrer que les systèmes cellulaires dynamiques sont en général plus performants que les ateliers spécialisés et que les systèmes cellulaires classiques, notamment sur le temps de passage moyen et maximal, l'encours moyen et maximal, ainsi que le retard moyen et maximal, sans bien sûr oublier le coût marginal total.

Enfin, comme il s'agit d'un concept en pleine émergence, plusieurs avenues de recherche sont identifiées afin de tirer pleinement profit de sa flexibilité.

## REMERCIEMENTS

L'Institut de Recherche sur les PME, pour le soutien financier et l'expérience acquise auprès des PME manufacturières et auprès des diverses personnes travaillant au sein de cette organisation. Tout spécialement MM. Jocelyn Drolet et Georges Abdounour de la Chaire Bombardier Produits Récréatifs pour leur précieuse expertise, leur disponibilité, et leurs judicieux conseils.

Le Groupe Createch et en particulier M. François Bazinet pour la capacité à remettre nos priorités en question et pour le goût de l'excellence.

Ma conjointe Kim pour sa patience au cours de ces années.

## TABLE DES MATIÈRES

LISTE DES FIGURES	V
LISTE DES TABLEAUX	VII
LISTE DES ANNEXES	IX
<b>1 DÉFINITION DU PROJET</b>	<b>2</b>
1.1 PROBLÉMATIQUE	2
1.2 OBJECTIFS	2
1.2.1 OBJECTIF GENERAL	2
1.2.2 OBJECTIFS SPECIFIQUES	2
1.3 HYPOTHÈSES	3
<b>2 ÉTAT DES CONNAISSANCES</b>	<b>5</b>
2.1 LES MODES DE PRODUCTION ET L'ENVIRONNEMENT MANUFACTURIER	5
2.1.1 LES LIGNES DE PRODUIT	6
2.1.2 LES ATELIERS SPECIALISES	6
2.1.3 LES CELLULES CLASSIQUES	7
2.1.4 LES FMS	8
2.1.5 LES CELLULES VIRTUELLES	9
2.1.6 LES CELLULES DYNAMIQUES	10
2.2 LES SYSTÈMES MANUFACTURIERS CELLULAIRES DYNAMIQUES	10
2.2.1 CHEMINEMENT ET AFFECTATIONS	11
2.2.2 CONFIGURATION DES CELLULES DYNAMIQUES	13
2.2.3 ORDONNANCEMENT	15
2.2.4 CONTROLE DU SYSTEME	20
2.3 MESURES DE PERFORMANCES DES SYSTÈMES DE PRODUCTION	21
<b>3 MÉTHODOLOGIE</b>	<b>24</b>
3.1 DÉFINITION DES VARIABLES	25
3.1.1 VARIABLES DEPENDANTES	25
3.1.2 VARIABLES INDEPENDANTES	35
3.2 SIMULATION INFORMATIQUE	57
3.2.1 L'APPROCHE PAR SIMULATION	57
3.2.2 CHOIX DU LANGAGE	58
3.2.3 DESCRIPTION DU PROGRAMME	59
3.3 DESIGN EXPÉRIMENTAL	63
3.3.2 CHOIX DES EFFETS A ANALYSER	64
3.3.3 SYNTHÈSE DU PLAN EXPERIMENTAL RETENU	69
<b>4 TRAITEMENT ET ANALYSE</b>	<b>71</b>
4.1 SYNTHÈSE DES RÉSULTATS	71
4.1.1 LA REGLE DE PRIORITE(FACTEUR A)	71
4.1.2 LE SYSTEME A L'ETUDE (FACTEUR B)	72
4.1.3 LE TYPE DE CALENDRIER (FACTEUR C)	73

4.1.4	L'HORIZON CONSIDERE (FACTEUR D)	73
4.1.5	LA TAILLE DES LOTS DE TRANSFERT INTERZONES (FACTEUR E)	74
4.1.6	LE NOMBRE DE PRODUITS DU CARNET DE COMMANDE (FACTEUR F)	75
4.1.7	LE COUT DE MANUTENTION LINEAIRE (FACTEUR G)	76
4.1.8	LA TAILLE MOYENNE DES COMMANDES (FACTEUR H1)	77
4.1.9	L'ETENDUE DE LA TAILLE DES COMMANDES (FACTEUR H2)	78
4.1.10	LA DUREE TOTALE MOYENNE DES CYCLES DE VIE (FACTEUR I1)	78
4.1.11	L'ETENDUE DE LA DUREE TOTALE DES CYCLES DE VIE (FACTEUR I2)	79
4.1.12	LE DELAI MOYEN ENTRE DATE DUE ET PRISE DE COMMANDE (FACTEUR J1)	80
4.1.13	L'ETENDUE DES DELAIS DE PREAVIS (J2)	81
4.1.14	INTERACTIONS	82
5	CONCLUSION ET RECOMMANDATIONS	84
5.1	CONCLUSION	84
5.2	AVENUES DE RECHERCHE	84
6	RÉFÉRENCES	86

## LISTE DES FIGURES

FIGURE 1. ENVIRONNEMENT ET FIABILITÉ DES ÉVÈNEMENTS	6
FIGURE 2. SCHÉMA DE FONCTIONNEMENT D'UN SMCD	11
FIGURE 3. EXEMPLE DE MATRICE DES ÉCHANGES INTERMACHINES (DONNÉES TRAITÉES)	12
FIGURE 4. EXEMPLE D'UNE CONFIGURATION	14
FIGURE 5. EXEMPLE D'UN CALENDRIER DE PRODUCTION (POUR TOUTES LES MACHINES)	16
FIGURE 6. EXEMPLE D'ORDONNANCEMENT AVEC COMMANDE FRACTIONNÉE	17
FIGURE 7. TEMPS DE RÉOLUTION SELON LE NOMBRE D'OPÉRATIONS À EFFECTUER	19
FIGURE 8. TYPES DE CALENDRIERS ET OPTIMALITÉ DE L'ORDONNANCEMENT	20
FIGURE 9. EXEMPLE DE PROGRESSION DU NIVEAU D'ENCOURS	31
FIGURE 10. HORIZONS DE CONFIGURATION, DE PLANIFICATION ET DE RÉÉVALUATION	43
FIGURE 11. SCHÉMA RÉSUMANT LES CARACTÉRISTIQUES MODÉLISÉES DES PRODUITS	44
FIGURE 12. POTENTIEL D'AMÉLIORATION DU TEMPS DE PASSAGE AVEC 2 PHASES	46
FIGURE 13. POTENTIEL D'AMÉLIORATION DU TEMPS DE PASSAGE AVEC 4 PHASES	47
FIGURE 14. POTENTIEL D'AMÉLIORATION AVEC 4 PHASES ET TEMPS D'OPÉRATIONS VARIÉS	48
FIGURE 15. ILLUSTRATION D'UNE SOLUTION IRRÉALISABLE À CAUSE DE LA GÉOMÉTRIE	52
FIGURE 16. NOMBRE DE DISTANCES INTERZONES SELON LE NOMBRE DE ZONES	53
FIGURE 17. SCHÉMA PARTIEL D'UN ÉVENTUEL SYSTÈME EXPERT POUR SMCD	57
FIGURE 18. SCHÉMA DE FONCTIONNEMENT SIMPLIFIÉ DU PROGRAMME PRINCIPAL	60
FIGURE 19. VUE D'ENSEMBLE DU MODULE D'EXÉCUTION	61
FIGURE 20. CONTRIBUTION AU TEMPS DE PASSAGE MOYEN	130
FIGURE 21. EFFETS SIGNIFICATIFS SUR LE TEMPS DE PASSAGE MOYEN PONDÉRÉ	130
FIGURE 22. CONTRIBUTION À L'ÉCART-TYPE PONDÉRÉ DU TEMPS DE PASSAGE	131
FIGURE 23. EFFETS SIGNIFICATIFS SUR L'ÉCART-TYPE DU TEMPS DE PASSAGE	132
FIGURE 24. CONTRIBUTION AU TEMPS DE PASSAGE MAXIMAL	133
FIGURE 25. EFFETS SIGNIFICATIFS SUR LE TEMPS DE PASSAGE MAXIMAL	133
FIGURE 26. CONTRIBUTION À LA VARIABILITÉ DU TAUX D'UTILISATION MOYEN	134
FIGURE 27. EFFETS SIGNIFICATIFS SUR LE TAUX D'UTILISATION MOYEN	135
FIGURE 28. CONTRIBUTION À L'ÉCART-TYPE DU TAUX D'UTILISATION	136
FIGURE 29. EFFETS SIGNIFICATIFS SUR L'ÉCART-TYPE DU TAUX D'UTILISATION	136
FIGURE 30. INTERACTION DU SYSTÈME (B) ET DURÉE DU CYCLE DE VIE (I1)	137
FIGURE 31. INTERACTION TAILLE DES COMMANDES (H1) ET DURÉE DU CYCLE DE VIE (I1)	137
FIGURE 32. INTERACTION DURÉE DU CYCLE DE VIE (I1) ET DÉLAI DE PRÉAVIS (J1)	138
FIGURE 33. CONTRIBUTION AU TAUX D'UTILISATION MINIMUM	139
FIGURE 34. EFFETS SIGNIFICATIFS SUR LE TAUX D'UTILISATION MINIMUM	139
FIGURE 35. CONTRIBUTION AU COÛT MARGINAL TOTAL	140
FIGURE 36. EFFETS SIGNIFICATIFS SUR LE COÛT MARGINAL TOTAL	141
FIGURE 37. CONTRIBUTION À L'ENCOURS MOYEN PONDÉRÉ	142
FIGURE 38. EFFETS SIGNIFICATIFS SUR L'ENCOURS MOYEN PONDÉRÉ	142
FIGURE 39. CONTRIBUTION À LA VARIABILITÉ DE L'ÉCART-TYPE PONDÉRÉ DE L'ENCOURS	143
FIGURE 40. EFFETS SIGNIFICATIFS SUR L'ÉCART-TYPE PONDÉRÉ DE L'ENCOURS	144
FIGURE 41. CONTRIBUTION À L'ENCOURS MAXIMAL	145
FIGURE 42. EFFETS SIGNIFICATIFS SUR L'ENCOURS MAXIMAL	145
FIGURE 43. CONTRIBUTION AU JEU MOYEN PONDÉRÉ	146

FIGURE 44. EFFETS SIGNIFICATIFS SUR LE JEU MOYEN PONDÉRÉ _____	147
FIGURE 45. CONTRIBUTION À L'ÉCART-TYPE PONDÉRÉ DU JEU _____	148
FIGURE 46. EFFETS SIGNIFICATIFS SUR L'ÉCART-TYPE PONDÉRÉ DU JEU _____	148
FIGURE 47. CONTRIBUTION AU JEU MAXIMAL _____	149
FIGURE 48. EFFETS SIGNIFICATIFS SUR LE JEU MAXIMAL _____	150
FIGURE 49. CONTRIBUTION AU RETARD MOYEN PONDÉRÉ _____	151
FIGURE 50. EFFETS SIGNIFICATIFS SUR LE RETARD MOYEN PONDÉRÉ _____	151
FIGURE 51. INTERACTION DE L'ÉTENDUE DES DURÉES DES CYCLES DE VIE (I2) ET DU SYSTÈME (B) _____	152
FIGURE 52. CONTRIBUTION À L'ÉCART-TYPE PONDÉRÉ DU RETARD _____	153
FIGURE 53. EFFETS SIGNIFICATIFS SUR L'ÉCART-TYPE PONDÉRÉ DU RETARD _____	153
FIGURE 54. INTERACTION DE LA TAILLE DES COMMANDES (H1) ET DE L'ÉTENDUE DES CYCLES DE VIE (I2) _____	154
FIGURE 55. INTERACTION DU SYSTÈME (B) ET DE L'ÉTENDUE DES DURÉES DES CYCLES DE VIE (I2) _____	154
FIGURE 56. CONTRIBUTION AU RETARD MAXIMAL _____	155
FIGURE 57. EFFETS SIGNIFICATIFS SUR LE RETARD MAXIMAL _____	156



## LISTE DES TABLEAUX

TABLEAU 1 EXEMPLE DE MATRICE DES ÉCHANGES INTERMACHINES (DONNÉES BRUTES)	12
TABLEAU 2 DISPONIBILITÉ DES PIÈCES	17
TABLEAU 3 EXEMPLE DE POTENTIEL DU FRACTIONNEMENT POUR LA COMMANDE B	17
TABLEAU 4 INDICATEURS DE PERFORMANCES RECONNUS	22
TABLEAU 5 EXEMPLE DE CALCUL DE LA MOYENNE ET DE LA VARIANCE DU TEMPS DE PASSAGE	26
TABLEAU 6 EXEMPLE DE CALCUL DE LA MOYENNE ET DE LA VARIANCE DU JEU	27
TABLEAU 7 EXEMPLE DE CALCUL DU JEU MAXIMAL	28
TABLEAU 8 EXEMPLE DE CALCUL DU RETARD MOYEN ET DE SA VARIANCE	29
TABLEAU 9 EXEMPLE DE CALCUL DU RETARD MAXIMAL	29
TABLEAU 10 CALCUL DU NIVEAU D'ENCOURS MOYEN	32
TABLEAU 11 EXEMPLE DE CALCUL DE LA VARIABILITÉ DE L'ENCOURS	33
TABLEAU 12 TAUX D'UTILISATION	34
TABLEAU 13 CARNET DE COMMANDE	36
TABLEAU 14 GAMMES DE FABRICATION ET TEMPS D'OPÉRATION	37
TABLEAU 15 INTRODUCTION DES COMMANDES SELON L'ORDRE PAPS	38
TABLEAU 16 INTRODUCTION DES COMMANDES SELON L'ORDRE DDUE	39
TABLEAU 17 INTRODUCTION DES COMMANDES SELON DDUE SANS SEUIL ET AVEC SEUIL	41
TABLEAU 18 AMÉLIORATION DU TEMPS DE PASSAGE SELON LE NOMBRE DE PHASES (EXEMPLE)	47
TABLEAU 19 ÉTAPES DE DÉVELOPPEMENT D'UN MODÈLE DE SIMULATION INFORMATISÉ	58
TABLEAU 20 ÉTAPES DES MÉTHODES TAGUCHI	63
TABLEAU 21 CLASSIFICATION ET NIVEAUX D'EXPÉRIMENTATION DES FACTEURS RETENUS	65
TABLEAU 22 INTERACTIONS POTENTIELLES	66
TABLEAU 23 FACTEURS FIXÉS POUR LES DIFFÉRENTS TYPES DE MACHINES	68
TABLEAU 24 PLAN EXPÉRIMENTAL RETENU	69
TABLEAU 25 RANG DES RÈGLES DE PRIORITÉ SUR LES PERFORMANCES	71
TABLEAU 26 RANG DES SYSTÈMES MANUFACTURIERS SELON LA MESURE DE PERFORMANCE	72
TABLEAU 27 RANG DES TYPES DE CALENDRIER SELON LA MESURE DE PERFORMANCE	73
TABLEAU 28 RANG DES HORIZONS CONSIDÉRÉS SELON LA MESURE DE PERFORMANCE	74
TABLEAU 29 RANG DES TAILLES DE LOTS DE TRANSFERTS SELON LA MESURE DE PERFORMANCE	74
TABLEAU 30 RANG DU NOMBRE DE PRODUITS SELON LA MESURE DE PERFORMANCE	75
TABLEAU 31 RANG DES COÛTS DE MANUTENTION SELON LA MESURE DE PERFORMANCE	76
TABLEAU 32 RANG DE LA TAILLE DES COMMANDES SELON LES MESURES DE PERFORMANCE	77
TABLEAU 33 RANG DES ÉTENDUES DE TAILLE DE COMMANDE SELON LA MESURE DE PERFORMANCE	78
TABLEAU 34 RANG DES DURÉES MOYENNES DE CYCLE DE VIE SELON LA MESURE DE PERFORMANCE	79
TABLEAU 35 RANG DES ÉTENDUES DES CYCLES DE VIE SELON LA MESURE DE PERFORMANCE	80
TABLEAU 36 RANG DES DÉLAIS DE PRÉAVIS SELON LA MESURE DE PERFORMANCE	81
TABLEAU 37 RANG DES ÉTENDUES DES DÉLAIS DE PRÉAVIS SELON LA MESURE DE PERFORMANCE	82
TABLEAU 38 ANALYSE DE VARIANCE DU TEMPS DE PASSAGE MOYEN PONDÉRÉ	129
TABLEAU 39 ANALYSE DE VARIANCE DE L'ÉCART-TYPE PONDÉRÉ DU TEMPS DE PASSAGE	131
TABLEAU 40 ANALYSE DE VARIANCE DU TEMPS DE PASSAGE MAXIMAL	132
TABLEAU 41 ANALYSE DE VARIANCE DU TAUX D'UTILISATION MOYEN	134
TABLEAU 42 ANALYSE DE VARIANCE DE L'ÉCART-TYPE DU TAUX D'UTILISATION	135
TABLEAU 43 ANALYSE DE VARIANCE DU TAUX D'UTILISATION MINIMUM	138

TABLEAU 44 ANALYSE DE VARIANCE DU COÛT MARGINAL TOTAL	140
TABLEAU 45 ANALYSE DE VARIANCE DE L'ENCOURS MOYEN PONDÉRÉ	141
TABLEAU 46 ANALYSE DE VARIANCE DE L'ÉCART-TYPE PONDÉRÉ DE L'ENCOURS	143
TABLEAU 47 ANALYSE DE VARIANCE DE L'ENCOURS MAXIMAL	144
TABLEAU 48 ANALYSE DE VARIANCE DU JEU MOYEN PONDÉRÉ	146
TABLEAU 49 ANALYSE DE VARIANCE DE L'ÉCART-TYPE PONDÉRÉ DU JEU	147
TABLEAU 50 ANALYSE DE VARIANCE DU JEU MAXIMAL	149
TABLEAU 51 ANALYSE DE VARIANCE DU RETARD MOYEN PONDÉRÉ	150
TABLEAU 52 ANALYSE DE VARIANCE DE L'ÉCART-TYPE PONDÉRÉ DU RETARD	152
TABLEAU 53 ANALYSE DE VARIANCE DU RETARD MAXIMAL	155

## LISTE DES ANNEXES

ANNEXE A : Heuristique de génération des calendriers de types active et <i>non-delay</i> _____	92
ANNEXE B : Règles de priorité populaires en ordonnancement de la production _____	95
ANNEXE C : Termes relatifs au langage orienté-objet _____	97
ANNEXE D : Schémas du modèle informatique _____	99
ANNEXE E : Formulaire de départ _____	112
ANNEXE F : Influence des variables de départ sur le cas généré _____	118
ANNEXE G : Analyse des résultats d'expérience _____	128
ANNEXE H : Exemple de tables de Fisher-Snedecor _____	157

## Introduction

Le capitalisme qui s'étend à l'échelle mondiale, l'ouverture des marchés, l'accès aux technologies de télécommunications, l'effort d'industrialisation des pays en voie de développement. Voilà quelques uns des facteurs macroéconomiques créant bien sûr des opportunités, mais aussi de fortes pressions pour les entreprises. Pour demeurer en vie, celles-ci doivent constamment améliorer leur compétitivité, d'où le recours à des philosophies ou techniques tel que Juste-À-Temps, réingénierie des processus d'affaires, Qualité Totale, KAIZEN SMED, KANBAN, GAQ, TPM, GT, etc.

Toutefois, dans l'application concrète de ces techniques, les PME manufacturières se heurtent à des facteurs externes sur lesquels ils ont peu ou pas de contrôle. En revanche, la maîtrise des procédés de transformation demeure en grande partie le créneau de différenciation des entreprises. Dans ce champ d'intervention limité, l'aménagement adéquat des ressources manufacturières constitue l'un des moyens d'optimiser la production.

Les observations en entreprise jumelées à de récentes recherches ont fait naître un nouveau concept dans ce domaine ; les cellules dynamiques. Le concept étant très jeune, les études à ce jour se concentrent autour du concept lui-même. Cependant les performances du modèle restent à préciser, bien que l'on soupçonne qu'il soit supérieur aux autres types d'aménagement traditionnellement utilisés, particulièrement en environnement turbulent.

Cette recherche tente donc d'établir le potentiel des systèmes cellulaires dynamiques en comparant les performances à d'autres modes de production utilisés dans un environnement manufacturier turbulent.

# 1 DÉFINITION DU PROJET

## 1.1 Problématique

Le concept des cellules dynamiques a été défini récemment afin de répondre aux nouvelles exigences en termes de flexibilité et de capacité d'adaptation dans un environnement manufacturier turbulent.

Le cœur du modèle proposé par Rheault (Rheault, Drolet, et Abdounour, 1996b) s'appuie sur le paradigme suivant :

*" Chaque poste de travail peut être relocalisé  
si cela est économiquement justifiable. "*

Plus précisément, l'algorithme d'optimisation vise à minimiser le coût marginal total de toutes les manutentions des produits et des machines pour un certain horizon à partir d'une programmation en nombre entiers.

Des recherches récentes tendent à indiquer que les systèmes manufacturiers cellulaires dynamiques (SMCD) seraient plus performants que les ateliers spécialisés (AS) ou que les systèmes manufacturiers cellulaires classiques (SMCC) pour les PME manufacturières. En effet, selon Rheault (Rheault, Drolet et Abdounour, 1995 ; Rheault, Drolet et Abdounour, 1996b) ce concept permet aux PME manufacturières d'accroître leur efficacité et leur efficience en améliorant leur flexibilité.

Toutefois, les recherches demeurent succinctes car les cas étudiés visent à présenter le modèle et analysent surtout la performance visée par le cœur du système, soit le coût marginal total de manutention.

## 1.2 Objectifs

### 1.2.1 Objectif général

L'objectif général est de comparer les performances des SMCD à d'autres modes de production utilisés dans un environnement manufacturier turbulent.

### 1.2.2 Objectifs spécifiques

Plusieurs aspects importants d'un SMCD restent à définir. L'expérimentation envisagée n'en explore que quelques-uns, mais les autres aspects sont néanmoins abordés.

Les objectifs spécifiques consistent à comparer les performances des SMCD aux SMCC et aux AS pour différents :

- degrés de turbulence de l'environnement manufacturier
- tailles des systèmes de production (ex : nombre de machines)

- modes de chargement (*loading*)
- stratégies d'ordonnancement
- horizons (et/ou d'autres variables de contrôle jugées pertinentes)

### 1.3 Hypothèses

Voici la liste des principales hypothèses ;

1. Les temps de manutention des machines n'affectent pas la production
2. Les postes sont relocalisés au moment de la réévaluation du système
3. Les temps de manutention des produits sont négligeables
4. Les temps de mise en course sont négligeables
5. Les pannes sont inexistantes
6. Une opération planifiée doit être entamée et terminée
7. Les routages sont caractérisés par des machines nommément identifiées (pour un cas donné)
8. La variabilité des temps d'opération est négligeable entre les répétitions d'une même opération
9. Les gammes sont linéaires, i.e. ne comportent que des étapes séquentielles
10. Les lots de transfert sont unitaires à l'intérieur d'une même zone (à noter que les zones ne contiennent pas nécessairement des cellules mutuellement exclusives)

Concernant les hypothèses #1 et #2, on peut supposer que la réévaluation du système et la relocalisation des postes de travail sont effectuées en dehors des horaires de travail. Ces hypothèses sont dès lors admissibles pour autant qu'aucune activité de production ne soit planifiée à ces moments. En pratique, cela signifie que les postes sont relocalisés par exemple le soir ou la fin de semaine, bref, lorsque le site n'est pas en production.

L'hypothèse #3 vise à alléger l'ordonnancement et est souvent admise dans la pratique car ce délai est souvent peu significatif par rapport au délai de production.

Concernant les hypothèses #4 et #5, on peut admettre des temps de mise en course négligeables et un système sans défaillance dans plusieurs contextes, d'autant plus que les techniques tel que le SMED et la TPM sont de plus en plus populaires. De plus, on peut admettre que la maintenance est effectuée en dehors des horaires de travail, au même titre que la relocalisation des postes de travail.

Les hypothèses #6 et #7 agissent sur l'ordonnancement, et permettent de simplifier le problème qui y est associé. Dans un contexte réel, il est admissible qu'une commande planifiée doive être entamée et terminée, sans quoi on assisterait régulièrement à des annulations ou repoussements continuels des ordres de travail dans l'atelier (règle "*no preempt*").

L'hypothèse #8 est courante dans tous les systèmes MRP II conventionnels, d'une part parce que la variabilité des temps d'opération n'est pas d'une grande utilité au niveau de la planification, et d'autre part parce que cette considération ajouterait un degré de complexité significatif au processus de planification déjà assez complexe.

L'hypothèse #9 est admissible lorsque l'assemblage est une activité plutôt marginale.

L'hypothèse #10 repose sur les principes de base de l'aménagement cellulaire.

## 2 ÉTAT DES CONNAISSANCES

### 2.1 Les modes de production et l'environnement manufacturier

On reconnaît que le mode de production dépend essentiellement du volume de production et de la variété des produits (Francis, McGinnis, et White, 1992). Traditionnellement, on associe la production à haut volume et à faible variété aux lignes d'assemblage (Francis, McGinnis, et White, 1992 ; Tompkins et White, 1984) tandis qu'une forte variété de produits à faibles volumes est associée aux ateliers spécialisés (Drolet, Montreuil, et Moodie, 1989b ; Francis, McGinnis, et White, 1992 ; Kusiak et Heragu, 1987). Entre ces deux extrêmes, on peut utiliser le mode de production cellulaire classique (Chobineh, 1988 ; Francis, McGinnis, et White, 1992 ; Kusiak et Heragu, 1987), des FMS (Greene et Cleary, 1985 ; Kusiak et Heragu, 1987 ; Masayuma, 1985), ou un mode cellulaire virtuel (Irani, 1993 ; Montreuil, Venkatadri, et Lefrançois, 1991 ; Montreuil, Drolet, et Lefrançois, 1992).

Par ailleurs, il est reconnu que l'écart entre les performances d'un atelier spécialisé et d'un système cellulaire dépend en bonne partie de l'environnement manufacturier, composé de caractéristiques internes et externes. Au chapitre des caractéristiques internes, citons par exemple, le nombre de phases, les temps d'opération, la taille des lots de transfert, la taille des lots de production, et l'exclusivité des cellules (Flynn et Jacobs, 1987 ; Kinney et McGinnis, 1987 ; Seifoddini et Djassemi, 1996 ; Shafer et Meredith, 1993). En ce qui concerne les caractéristiques externes typiques d'un environnement turbulent, on note principalement :

- une grande variabilité de la demande et des lots de production (Irani, 1993 ; Montreuil, Venkatadri, et Lefrançois, 1991 ; Ramudhin et Rochette, 1991)
- une grande variabilité des temps d'opérations (Irani, 1993)
- une grande variabilité des temps de montage (Ramudhin et Rochette, 1991)
- une demande totalement ou partiellement imprévisible (Hayes et Pisano, 1994 ; Montreuil, Venkatadri, et Lefrançois, 1991 ; Rajmani, Singh, et Aneja, 1992)
- les changements fréquents de la gamme de produits (Greene et Cleary, 1985 ; Irani, 1993 ; Kusiak et Heragu, 1987 ; Montreuil, Drolet, et Lefrançois, 1992)
- des jalonnements variés d'opération (Irani, 1993 ; Montreuil, Drolet, et Lefrançois, 1992)
- la compétition imprévisible (Hayes et Pisano, 1994)

Pour un environnement manufacturier turbulent, l'aménagement devient donc un problème tridimensionnel (variété, volume, temps) car il remet en question la robustesse de l'aménagement sur un long horizon de planification et suppose que des changements doivent être apportés fréquemment (Heragu et Kochhar, 1994). En effet, plus l'environnement manufacturier est turbulent, plus la fiabilité des événements attendus diminue rapidement à mesure que l'horizon temporel considéré est grand (voir Figure 1), avec des répercussions sur les flux et la



performance du système. En somme, le cycle de vie des produits s'ajoute au volume de production et à la variété des produits dans le choix du mode de production (Rheault, 1999).

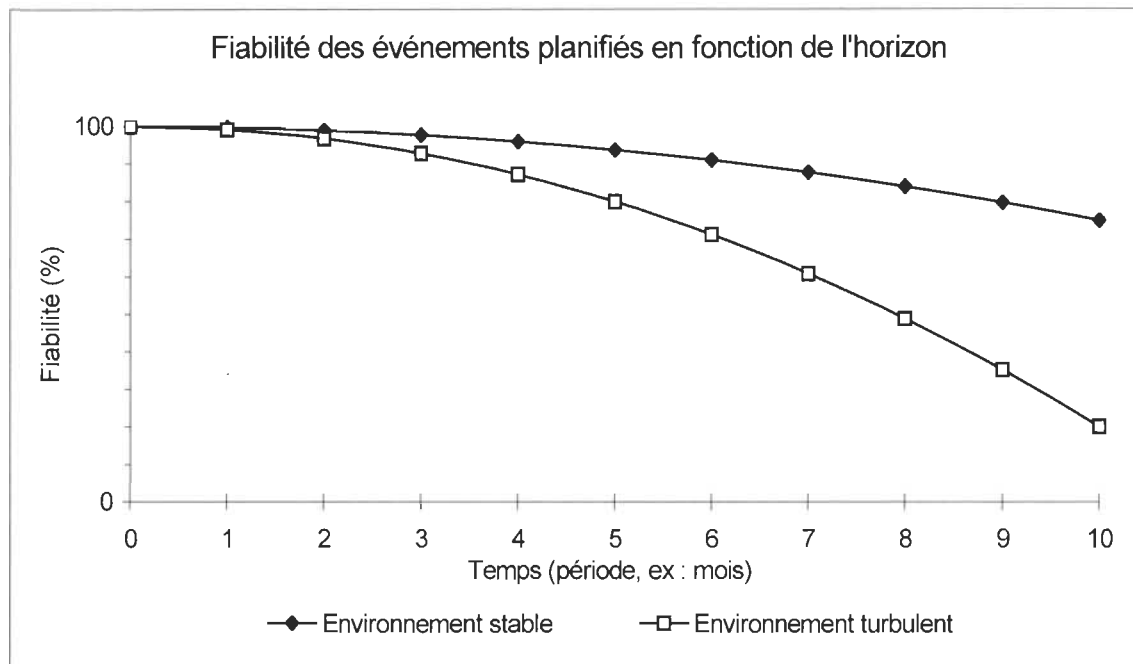


Figure 1. Environnement et fiabilité des événements

### 2.1.1 Les lignes de produit

L'aménagement d'une ligne d'assemblage s'appuie en partie sur le diagramme de préséance des activités d'assemblage du produit. Typiquement, les produits sont déplacés d'un poste de travail au poste adjacent au moyen d'un convoyeur. Des flux rectilignes et bien planifiés résultent généralement de cet aménagement conçu pour de hauts volumes de production (Tompkins et White, 1984).

Ce mode de production est recommandé lorsqu'il y a très peu de variété et une demande élevée, ce qui correspond à la phase de maturité des produits (Drolet, Montreuil, et Moodie, 1989b ; Francis, McGinnis, et White, 1992 ; Greene et Sadowski, 1982 ; Greene et Cleary, 1985 ; Kusiak et Heragu, 1987 ; Tompkins et White, 1984).

Ce mode de production est quasi-impraticable en environnement turbulent avec une clientèle diversifiée (Rheault, Drolet, et Abdulnour, 1996a). Il n'est donc pas pertinent en regard de l'objectif de cette étude, et en est par conséquent exclu.

### 2.1.2 Les ateliers spécialisés

Ce mode de production consiste à regrouper toutes les machines semblables dans un même département (Drolet, Montreuil, et Moodie, 1989b ; Francis, McGinnis, et White, 1992 ; Tompkins

et White, 1984) Ce mode de production permet généralement un taux d'utilisation des ressources élevé (car contrairement aux cellules, pas de duplication pour permettre l'exclusivité), et requiert une moins grande polyvalence des employés au sein d'un même département. Ce mode de production peut accommoder une grande variété de pièces.

Ainsi, la volonté de limiter le plus longtemps possible les modifications à l'aménagement conjuguée au besoin de flexibilité dans un environnement turbulent limite souvent le choix du mode de production aux ateliers spécialisés.

Cependant ce mode de production est souvent le moins efficient. En effet, les importants échanges interdépartementaux typiques de ce type d'aménagement sont compensés par une diminution de la fréquence des manutentions, elle-même permise par l'augmentation de la taille des lots de transferts, ce qui entraîne toutefois des temps d'attente et des niveaux d'encours élevés, et par conséquent l'augmentation des temps de passage. En fait, en excluant la flexibilité de produits, un atelier multigamme ne comporte aucun avantage concurrentiel (Rheault, Drolet, et Abdulnour, 1996a).

### **2.1.3 Les cellules classiques**

Le mode de production cellulaire repose essentiellement sur l'application des technologies de groupe (GT) à la production. Traditionnellement, une cellule manufacturière se définit comme un regroupement physique de machines hétérogènes dédiées à la production d'une famille de produits ayant des caractéristiques similaires (Burbidge, 1979 ; Wemmerlov, 1988). Il existe de plus en plus d'heuristiques de formation des familles et des cellules, mais la recherche d'une solution optimale est presque impossible, puisqu'il s'agit d'un problème NP-complet (Irani, 1993). Les principaux avantages associés à un mode de production cellulaire sont une diminution des encours, des temps de passage, des rejets, du temps de réaction, ainsi que la simplification des flux et du contrôle de la production (Burbidge, 1975 ; Hyer, 1984 ; Schonberger, 1986 ; Wemmerlov et Hyer, 1987) . Notons toutefois que pour tirer tous les avantages du concept cellulaire, une condition essentielle est la capacité de transférer les pièces unitairement entre les machines d'une même cellule manufacturière (Venkatesan, 1990). Ainsi, l'accumulation de lots de transfert au sein des cellules est évitée (Kinney et McGinnis, 1987) et les étapes se chevauchent dans le temps (*overlapping*).

Toutefois, la production cellulaire est un compromis entre l'efficacité des lignes d'assemblage et la flexibilité de produits que nous procurent les ateliers spécialisés (Rheault, Drolet, et Abdulnour, 1996a). Ce compromis sur la flexibilité entraîne, avec le temps, un phénomène appelé vieillissement des cellules manufacturières.

En effet, les variations du mix-produit contribuent à augmenter les flux intercellulaires, ce qui entraîne une diminution progressive de la performance du système cellulaire manufacturier correspondant (McAulley, 1972 ; King et Nacornchai, 1982). Concrètement, on assiste à une

complexification progressive des flux au sein des cellules, puis des échanges intercellulaires apparaissent. Les cellules sont alors désuètes (Greene et Cleary, 1985). Le phénomène de vieillissement est donc plus important lorsque le mix-produit varie beaucoup (Seifoddini et Djassemi, 1996) et qu'il y a des changements fréquents dans les opérations des produits (Kusiak et Heragu, 1987).

D'ailleurs, on retrouve dans la littérature une controverse concernant la supériorité des ateliers spécialisés par rapport aux cellules classiques (Flynn et Jacobs, 1987 ; Shafer et Meredith, 1993), controverse qui gravite essentiellement autour du contexte manufacturier (interne et externe). Plus précisément, on aborde de différentes façons la question suivante : À partir de quel niveau de « volatilité » de la matrice produits/procédés l'aménagement par ateliers spécialisés devient plus rentable que l'aménagement cellulaire classique. Parmi les principaux facteurs qui limitent le potentiel des cellules classiques par rapport aux ateliers spécialisés, on note :

- une haute densité de la matrice pièces-machines
- l'absence de familles "naturelles" de produits (qui dépend en partie du point précédent)
- peu de machines nécessaires à la fabrication des produits
- peu de phases nécessaires à la fabrication des produits
- la présence de goulots d'étranglements
- de courts délais de manutention
- des mises en course indépendantes

De plus, les facteurs typiquement associés à la turbulence de l'environnement manufacturier (voir p.5) peuvent limiter considérablement le potentiel des cellules classiques. D'ailleurs, certaines recherches concluent qu'au dessus d'un certain degré de variation de la matrice pièces-machines par rapport à son état initial (phénomène de vieillissement des cellules typique d'un environnement turbulent), il serait préférable de conserver un mode départemental (Seifoddini et Djassemi, 1996).

#### **2.1.4 Les FMS**

Typiquement, un FMS (*Flexible Manufacturing System*) est composé d'un système de machines automatisées et de moyens de manutention automatisés, tous contrôlés par un ordinateur central (Saifallah, 1992). Ils sont souvent configurés en cellules manufacturières (*Flexible Manufacturing Cells*) car ils sont plus faciles à gérer ainsi (Greene et Cleary, 1985 ; Kusiak et Heragu, 1987). À ce niveau, l'approche pour les configurer est similaire aux cellules manufacturières, mais c'est dans leur développement, leur gestion et leur capacité qu'elles diffèrent (Greene et Cleary, 1985 ; Kusiak et Heragu, 1987).

De nombreuses recherches sur le sujet vantent les mérites des FMS. Parmi les améliorations mentionnés, les plus courantes concernent la flexibilité quant à la taille des lots, la variété de produits et les changements du mix-produit, la réduction des temps de mise en course, des temps de passage, des taux de rejets, des pertes de matériel, de l'espace de plancher requis, la diminution du niveau des stocks de matières premières et d'encours, et enfin, l'élargissement du marché cible de l'entreprise grâce à l'acquisition d'avantages concurrentiels significatifs (Bessant et Haywood, 1988 ; Choo, 1994 ; Gupta et Buzacott, 1989 ; Knudsen et al., 1994 ; Milgrom et Roberts, 1990 ; Oakey et O'Farrell, 1992 ; Rutherford, 1994 ; Schonberger, 1989 ; Tombak et DeMeyer, 1988).

Toutefois, même les études les plus optimistes concèdent que l'implantation et l'exploitation efficiente des technologies de pointe, et plus particulièrement des FMS, présentent des difficultés d'envergure.

Les défis les plus fréquents sont le coût d'acquisition excessivement élevé, la complexité de l'exploitation efficiente de telles technologies et l'expertise que cela sous-entend, la quantité et le format des informations requises, les changements organisationnels (et la résistance que cela suscite), la formation des employés, et l'engagement soutenu de la direction (Chen et Chung, 1991 ; Gupta, Evans, et Gupta, 1991 ; Hayes et Pisano, 1994 ; Muscatello et Greene, 1990 ; Martinez Sanchez, 1994 ; Upton, 1995). Certaines études de cas arguent qu'en pratique, l'ampleur de ces prérequis peut limiter considérablement le succès de l'implantation (Inman, 1991), ou même aller à l'encontre des objectifs initiaux en diminuant la flexibilité des entreprises (Jaikumar, 1986 ; Upton, 1995).

On comprendra donc que l'implantation d'un FMS représente un défi complet et à long terme, d'autant plus difficile à relever pour les PME qui disposent rarement des ressources financières, techniques et organisationnelles suffisantes et adéquates.

### **2.1.5 Les cellules virtuelles**

Le concept de cellule virtuelle est un concept qui est né de la volonté de mieux exploiter et gérer les FMS. Une cellule virtuelle est un regroupement logique de processeurs (machines) à l'intérieur d'un système informatique. Quoique considéré comme une cellule par un contrôleur, elle n'a cependant aucune transposition physique quant à l'emplacement des machines (Drolet, Montreuil, et Moodie, 1989a ; Drolet, Montreuil, et Moodie, 1989b ; McLean, Bloom, et Hopp, 1982 ; Montreuil, Venkatadri, et Lefrançois, 1991 ; Montreuil, Drolet, et Lefrançois, 1992 ; Harvey, 1992 ; Irani, 1993).

Jusqu'à maintenant, il y a eu très peu de recherches concernant les cellules virtuelles. Les études répertoriées démontrent que ces dernières accroissent la flexibilité des systèmes manufacturiers, en particulier pour les FMS (Drolet, Montreuil, et Moodie, 1989a ; Drolet, Montreuil, et Moodie, 1989b ; Montreuil, Venkatadri, et Lefrançois, 1991 ; Montreuil, Drolet, et Lefrançois, 1992 ; Harvey, 1992 ; Irani, 1993).

D'autres recherches sur les cellules virtuelles concernent l'aménagement des installations afin de tirer pleinement profit des cellules virtuelles (Irani, Cohen, et Cavalier, 1992 ; Irani, Cavalier, et Cohen, 1993b ; Marcotte et Montreuil, 1995 ; Montreuil, Venkatadri, et Ratliff, 1993).

Cependant, les cellules n'étant que logiques et connues uniquement du système informatique, cela exige un haut niveau d'information et de communication (Montreuil, Drolet, et Lefrançois, 1992 ; Harvey, 1992) entre toutes les machines de la production.

### **2.1.6 Les cellules dynamiques**

Les cellules dynamiques sont nées de deux observations, l'une sur les cellules virtuelles, l'autre sur la gestion des cellules de production en entreprise. D'une part, Montreuil (Montreuil, Drolet, et Lefrançois, 1992) affirme, malgré l'absence de recherche dans ce cas précis, que les cellules virtuelles seraient optimales dans un contexte où des processeurs seraient mobiles. D'autre part, Greene (Greene et Cleary, 1985) mentionne les cas d'entreprises qui ont expérimenté des cellules manufacturières ne produisant qu'une très petite famille de produits, cellules qui étaient dissoutes une fois la production terminée.

Cette pratique a aussi été observée dans le cadre des études de caractérisation JÂT/PVA menées par la Chaire Bombardier Produits Récréatifs, et ce, dans divers secteurs manufacturiers, tel que la confection des housses de sièges et leur assemblage, l'usinage, et même le moulage d'aluminium sous pression.

Les cellules dynamiques peuvent donc être définies comme des cellules virtuelles physiquement reconfigurables. Elles s'appuient sur le paradigme selon lequel tout poste de travail ou machine peut être déplacé à tout moment, si c'est économiquement justifiable de le faire (Rheault, Drolet, et Abdulnour, 1995).

Les recherches sur les cellules dynamiques concernent surtout la modélisation et la validation du modèle d'optimisation du coût marginal total de manutention en fonction des cas présentés (Rheault, Drolet, et Abdulnour, 1995 ; Rheault, Drolet, et Abdulnour, 1996b ; Marcoux, Drolet, et Abdulnour, 1997).

## **2.2 Les systèmes manufacturiers cellulaires dynamiques**

Le concept a été récemment modélisé et inscrit au cœur d'un système de gestion manufacturière par Rheault (Rheault, Drolet, et Abdulnour, 1995 ; Rheault, Drolet, et Abdulnour, 1996b). Le système manufacturier cellulaire dynamique (SMCD) est composé de 4 modules principaux :

1. Cheminement et affectations
2. Configuration des cellules dynamiques
3. Ordonnancement
4. Contrôle du système

Les interactions entre ces quatre modules sont succinctement schématisées à la Figure 2.

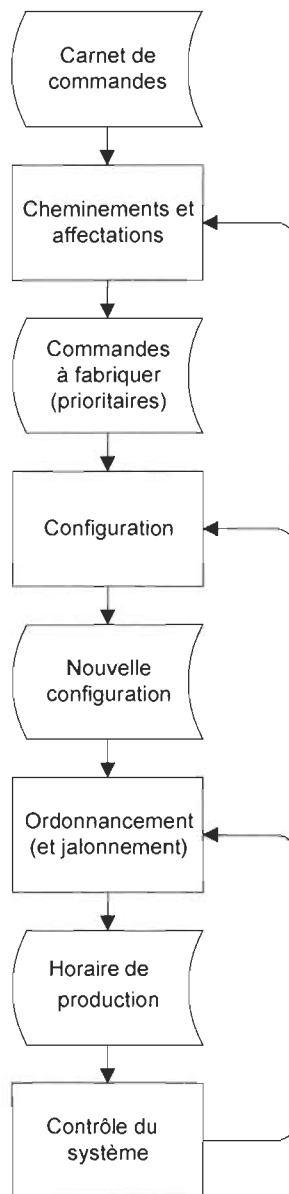


Figure 2. Schéma de fonctionnement d'un SMCD

### 2.2.1 Cheminement et affectations

Ce module détermine le cheminement des produits, i.e. l'ordre séquentiel des machines requises pour la fabrication d'un produit, de même que le volume des échanges<sup>1</sup> au sein du système, que

---

<sup>1</sup>Le volume des échanges se définit comme le nombre d'allers-retours (manutentions de charges unitaires) entre les machines pour une période donnée en fonction de la production planifiée pour cette période.

l'on peut représenter sous la forme d'une matrice De-À des échanges intermachines<sup>2</sup> (voir Tableau 1 et Figure 3).

Tableau 1  
Exemple de matrice des échanges intermachines (données brutes)

Commande	Nb. Pièces*	Échanges	Séquence
A	300	3	2, 5, 7, 2
B	500	5	3, 6, 3
C	700	7	1, 4, 8, 9, 5

\* Pour simplifier l'exemple, on suppose que le lot de transfert est de 100 pièces pour toutes les étapes de tous les produits. De plus, on suppose que chaque commande représente un produit différent.

De   À	1	2	3	4	5	6	7	8	9	10	Somme De
1				7							7
2					3						3
3						5					5
4								7			7
5							3				3
6			5								5
7		3									3
8									7		7
9					7						7
10											0
Somme À	0	3	5	7	10	5	3	7	7	0	47

Figure 3. Exemple de matrice des échanges intermachines (données traitées)

Soulignons certaines particularités de l'exemple des Tableau 1 et Figure 3 :

- le nombre d'étapes varie d'un produit à l'autre
- la machine #10 n'a pas d'échange avec les autres machines
- la machine #1 ne reçoit aucune pièce, mais est un fournisseur pour la machine #4
- la machine #5 reçoit de plusieurs sources, soient les machines #2 et #9
- la séquence de la commande A comporte un retour en arrière sous forme de boucle
- la séquence de la commande B comporte un retour en arrière sous forme de "rebond", i.e. qu'il n'y a qu'une seule phase (la machine #6) comprise entre deux arrêts à une même machine (la machine #3)
- des machines servent à plusieurs produits (cellules non-mutuellement exclusives), tel que la machine #5 qui sert aux commandes A et C

<sup>2</sup> La matrice De-À des échanges intermachines spécifie le nombre de manutentions unidirectionnelles d'un poste à l'autre, pour l'ensemble des postes.

Plusieurs études ont couvert la problématique associée au cheminement et à l'affectation. Les modèles employés dans ce module doivent être choisis selon les résultats escomptés car ils affectent significativement les performances du système (Chen et Chung, 1991 ; Chobineh, 1988 ; Greene et Cleary, 1985 ; Kusiak et Heragu, 1987 ; Rajmani, Singh, et Aneja, 1992).

### 2.2.2 Configuration des cellules dynamiques

La configuration est le résultat de l'attribution des machines dans les zones, qui donne l'aspect d'ensemble de l'aménagement des ressources au sein du système.

Le module de configuration détermine la configuration optimale pour l'ensemble des machines (ou postes de travail) à l'intérieur des zones (les zones se définissent comme une délimitation physique ou logique d'une partie du site de production (voir p.51)).

Plus précisément, le modèle de programmation en nombre entiers (Rheault, Drolet, et Abdounour, 1996b) énoncé ci-dessous cherche à minimiser le coût marginal total des manutentions. Celui-ci représente l'ensemble des coûts associés à la manutention des produits et des machines entre les zones.

$$\text{MIN} \sum_k \sum_z (CG_{kz} * X_{kz}) + \sum_p \sum_k \sum_l (CM_{pkl} * E_{pkl} * D_{kl}) \quad (1)$$

Sujet à:

$$\sum_k u_k X_{kz} \leq U_z \quad \forall z \quad (2)$$

$$\sum_z X_{kz} = 1 \quad \forall k \quad (3)$$

$$M(X_{kz} + X_{lw} - 2) + d_{zw} \leq D_{kl} \quad \forall z, \forall w, \forall E_{pkl} > 0 \quad (4)$$

$$X_{kz} + X_{lz} \leq 1 \quad \forall z \quad (5)$$

k : un poste de travail

z : une zone

l : le poste de travail suivant

w : la zone pouvant contenir le poste de travail suivant l

p : un produit

$X_{kz}$  : variable binaire valant 1 si le poste de travail k est dans la zone z, 0 autrement

$X_{lw}$  : variable binaire valant 1 si le poste de travail suivant l est dans la zone w, 0 autrement

$CG_{kz}$  : le coût de configuration du poste de travail k dans la zone z

$CM_{pkl}$  : le coût de manutention d'un lot de transfert du produit p entre les postes k et l par unité de distance

$E_{pkl}$  : le nombre d'échanges du produit p entre les postes k et l

$D_{kl}$  : la distance entre la zone contenant le poste de travail k et la zone contenant le poste de travail l



- $u_k$  : l'espace requis par le poste de travail  $k$  dans une zone  
 $U_z$  : l'espace disponible de la zone  $z$   
 $M$  : un très grand nombre

Afin de simplifier le problème, on considère que les échanges intrazones, i.e. les manutentions entre des postes situés à l'intérieur d'une même zone, correspondent aux meilleurs flux possibles. La disposition des machines à l'intérieur des zones n'est pas considérée car elle devient triviale et n'affecte pas significativement la performance du système (Rheault, Drolet, et Abdunour, 1996b).

La Figure 4 illustre les concepts de base soutenant le module de configuration, en faisant suite à l'exemple présenté plus haut.

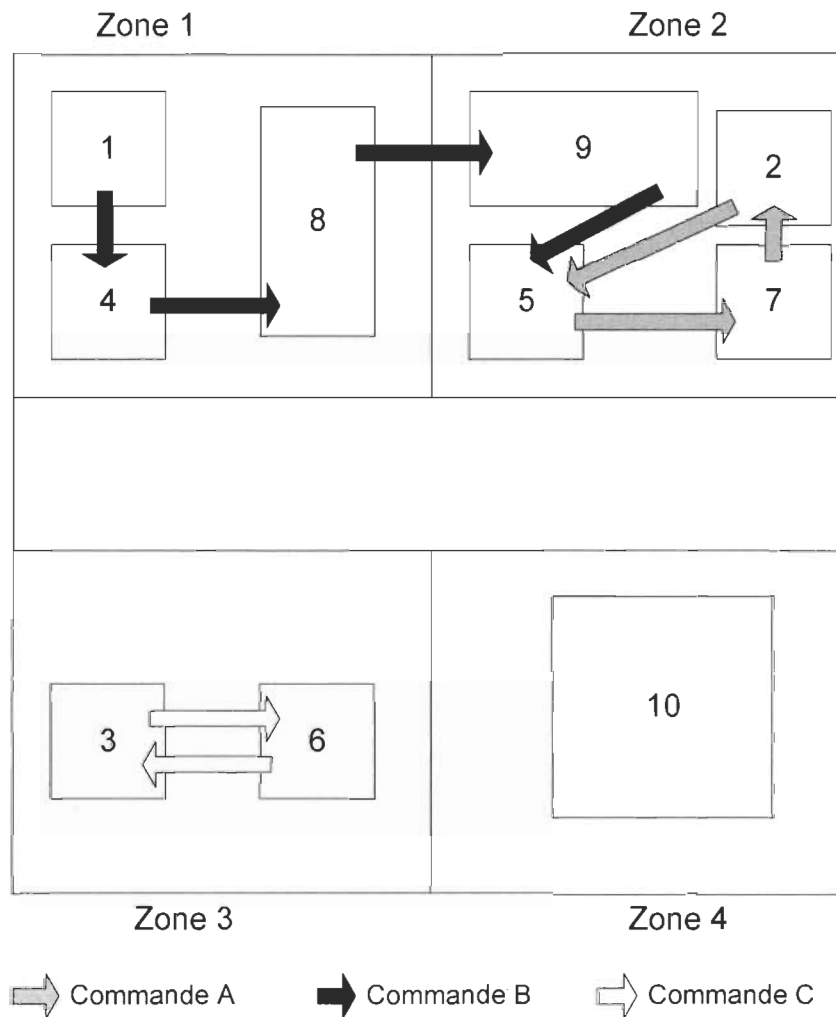


Figure 4. Exemple d'une configuration

On remarque les points suivants :

- il y a 4 zones, de surfaces égales, délimitées deux à deux par un passage.
- la distance entre les centroïdes des zones côte-à-côte est inférieure à celle des zones situées en vis-à-vis de part et d'autre du passage, distance elle-même inférieure à celle entre des zones situées en diagonale l'une de l'autre.
- la commande A est entièrement réalisée dans la Zone 2.
- la commande C est entièrement réalisée dans la Zone 3.
- les 3 premières étapes de la commande B sont réalisées dans la Zone 1. Il y a ensuite un échange entre les machines 8 et 9 situées respectivement dans les Zones 1 et 2. Les 2 dernières étapes sont réalisés dans la Zone 2. Cela est attribuable à 2 facteurs ; d'une part, la Zone 1 ne dispose pas de l'espace nécessaire pour accueillir toutes les machines nécessaires pour réaliser la commande B, d'autre part, la machine 5 est aussi requise pour la réalisation de la commande A.

### 2.2.3 Ordonnancement

Traditionnellement, on classifie les problèmes d'ordonnancement<sup>3</sup> selon le nombre de machines, le nombre d'ordres de fabrication (OF), le mode de production<sup>4</sup>, et la mesure de performance évaluée (French, 1982). Il est reconnu que les heuristiques d'ordonnancement sont directement liés au mode de production (French, 1982).

La Figure 5 illustre un calendrier de production<sup>5</sup> sous forme de diagramme de Gantt. Pour fins de simplification, on a détaillé et modifié l'exemple introduit précédemment comme suit :

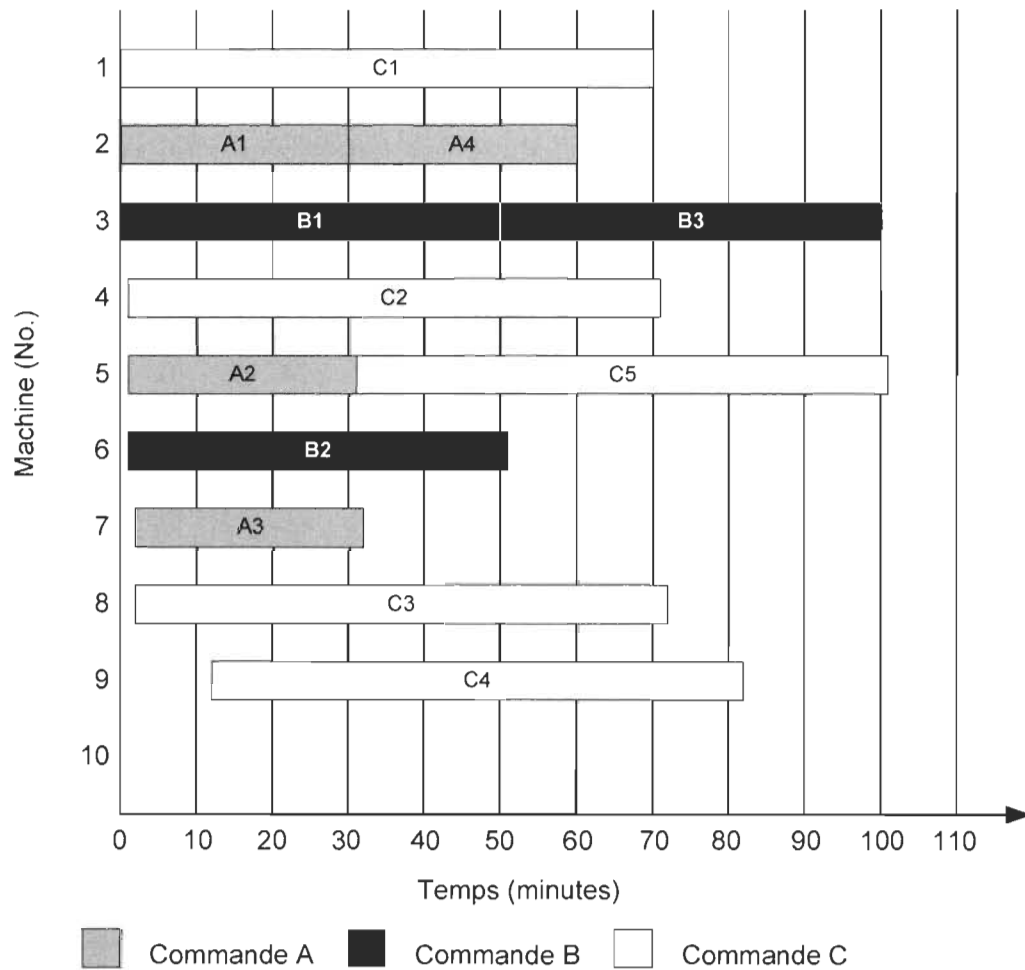
- tous les temps d'opération sont de 1 minute, pour toutes les étapes de tous les produits
- les lots de transfert interzones sont de 10 pièces
- les lots de transfert intrazone sont unitaires
- l'ordre d'entrée est Premier Arrivé, Premier Servi (PAPS)
- la taille des commandes a été divisée par 10, donc commande A = 30 pièces, commande B = 50 pièces, et commande C = 70 pièces
- les commandes ne sont pas fractionnées
- les commandes sont toujours démarrées au plus tôt (i.e. jalonnement aval)

---

<sup>3</sup> Ici, on ne distingue pas entre ordonnancement et jalonnement ; on se réfère à la notion (plus précise) du jalonnement. Il s'agit du dernier niveau de planification qui permet de déterminer les dates de début et de fin des ordres de fabrication, et donc le calendrier de production.

<sup>4</sup>Le mode de production peut être départemental, cellulaire, etc. (voir section 2.1, p.5).

<sup>5</sup>Le calendrier de production détermine l'emploi du temps de chaque machine pour une période donnée.



Note : Les opérations sont identifiées par la commande et l'étape, par exemple A1 désigne la première étape de la commande A.

Figure 5. Exemple d'un calendrier de production (pour toutes les machines)

On remarque les points suivants pour l'exemple :

- toutes les commandes débutent au temps 0
- l'étape 4 de la commande A (machine #2) est repoussée à cause de la première étape de la même commande
- l'étape 3 de la commande B (machine #3) est repoussée à cause de la première étape de la même commande
- l'étape 4 de la commande C (machine #9) est repoussée à cause du délai d'accumulation du premier lot de transfert ( $10 \text{ pièces} \times 1 \text{ minute/pièce} = 10 \text{ minutes}$ ) venant de l'étape précédente. Cela illustre les pertes de chevauchement provenant de l'accumulation de lots de transferts
- l'étape 5 de la commande C est repoussée à cause de la deuxième étape de la commande A (machine #5)

- la disponibilité des commandes selon cet ordonnancement est résumée au Tableau 2

Tableau 2  
Disponibilité des pièces

	Commande A	Commande B	Commande C
Première pièce	31 <sup>e</sup> minute	51 <sup>e</sup> minute	32 <sup>e</sup> minute
Lot complet	60 <sup>e</sup> minute	100 <sup>e</sup> minute	101 <sup>e</sup> minute

Notons que des politiques d'ordonnancement différentes auraient donné des résultats différents. De plus, dans l'éventualité où on aurait pu fractionner la commande B en 2 lots de production (toujours en négligeant les temps de mise en course), on aurait obtenu le jalonnement illustré à la figure suivante.

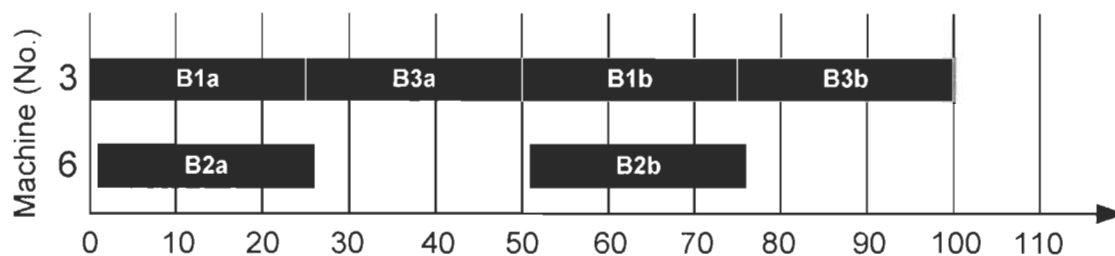


Figure 6. Exemple d'ordonnancement avec commande fractionnée

On remarque que la première pièce de cette commande aurait été disponible dès la 26<sup>e</sup> minute, et la première moitié de la commande aurait été complétée dès la 50<sup>e</sup> minute. Le tableau suivant illustre le potentiel du fractionnement sur le temps de réaction pour différents facteurs de fractionnement.

Tableau 3  
Exemple de potentiel du fractionnement pour la commande B

Facteur de fractionnement (Nb. de lots)	Taille des lots (Nb. d'unités)	Première pièce (Min.)	Premier lot complet (Min.)
1	50	51	100
2	25	26	50
5	10	11	20
10	5	6	10
50*	1	3*	3*

\* Dans le cas où les lots de production sont unitaires, c'est le temps total d'opération par pièce qui devient déterminant pour établir la disponibilité des pièces.

Ainsi, l'ordonnancement de la production dans un SMCD relève encore d'études à venir puisqu'il n'y a pas encore de modèle conçu spécifiquement pour ce concept (Rheault, Drolet, et Abdulnour, 1996b). Ce module doit élaborer un calendrier de production à partir des résultats des modules précédents et de l'état du système. Les principaux objectifs de ce calendrier sont :

- évaluer le moment opportun pour déplacer chaque machine<sup>6</sup>
- minimiser les arrêts de production (Rheault, Drolet, et Abdounour, 1995 ; Rheault, Drolet, et Abdounour, 1996b)
- établir un calendrier de production complet et compréhensible pour le personnel concerné (Rheault, Drolet, et Abdounour, 1995, Rheault, Drolet, et Abdounour, 1996b)
- fournir au module suivant les informations permettant de suivre l'évolution de la production (Rheault, Drolet, et Abdounour, 1995 ; Rheault, Drolet, et Abdounour, 1996b)

Rheault (Rheault, Drolet, et Abdounour, 1996b) mentionne qu'il peut être stratégique d'attendre le plus longtemps possible avant de déplacer les machines, en particulier si on s'attend à de nouveaux événements forçant une réévaluation des modules précédents.

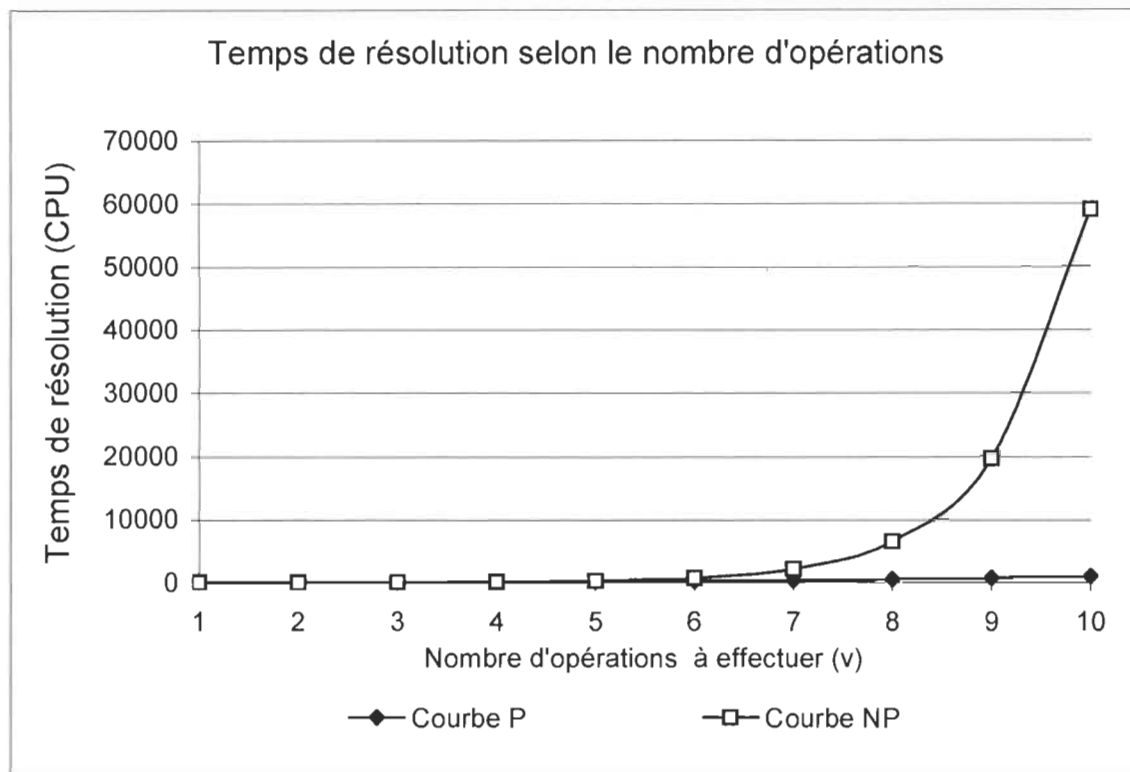
### *Complexité du problème d'ordonnancement*

La littérature reconnaît que la majorité des problèmes d'ordonnancement se classe parmi les problèmes NP-complets. Par exemple, pour 4 ordres de fabrication à planifier avec 3 machines dans un environnement départemental, on a  $(4!)^3 = 18824$  solutions possibles.

Un problème NP-complet est un problème pour lequel le temps de résolution par un certain algorithme suit une courbe **exponentielle** en fonction de la taille du problème (de classe non-polynomiale, contrairement à une courbe polynomiale), et pour lequel on considère qu'il n'existera **jamais** d'algorithme dont le temps de résolution serait polynomial, en raison de la nature même de ce problème. La Figure 7 illustre les temps de résolution de deux problèmes, l'un de classe P, l'autre de classe NP.

---

<sup>6</sup> Une approche consisterait à déplacer chaque machine après la fin du traitement de l'ordre de fabrication qui était en cours au moment de la réévaluation, ce qui implique de replanifier les ordres de fabrication ultérieurs, avec les nouveaux ordres de fabrication.



Courbe P :  $\text{Temps} = v^3$ , où  $v$  représente le nombre d'opérations mathématiques à effectuer.  
 Courbe NP :  $\text{Temps} = 3^v$ , où  $v$  représente le nombre d'opérations mathématiques à effectuer.

Figure 7. Temps de résolution selon le nombre d'opérations à effectuer

Afin de réduire ce temps de résolution, on délaisse l'énumération complète (trouver toutes les solutions et choisir la meilleure) au profit d'une approche de programmation dynamique (explorer progressivement les solutions et éliminer les avenues de solutions peu prometteuses). Si cela ne suffit pas, on utilise les heuristiques, des méthodes de résolution qui ne donnent pas des solutions nécessairement optimales (par opposition aux algorithmes), mais reconnues pour donner des solutions très acceptables. Pour les problèmes de type  $n/m/G/B^7$  (*general job shop*), le calendrier de type « actif », et le calendrier « *non-delay* » qui forme une sous-classe du précédent (voir figure suivante), sont des heuristiques de programmation dynamique applicables avec succès à un grand nombre de cas. Les heuristiques de génération des calendriers de types actif et *non-delay* sont détaillés à l'ANNEXE A. La solution optimale peut se situer n'importe où parmi ces catégories.

<sup>7</sup>Cette notation signifie  $n$  ordres de travail sur  $m$  machines dans un environnement de type ateliers spécialisés ( $G$ ) et optimisant la mesure de performance  $B$ .

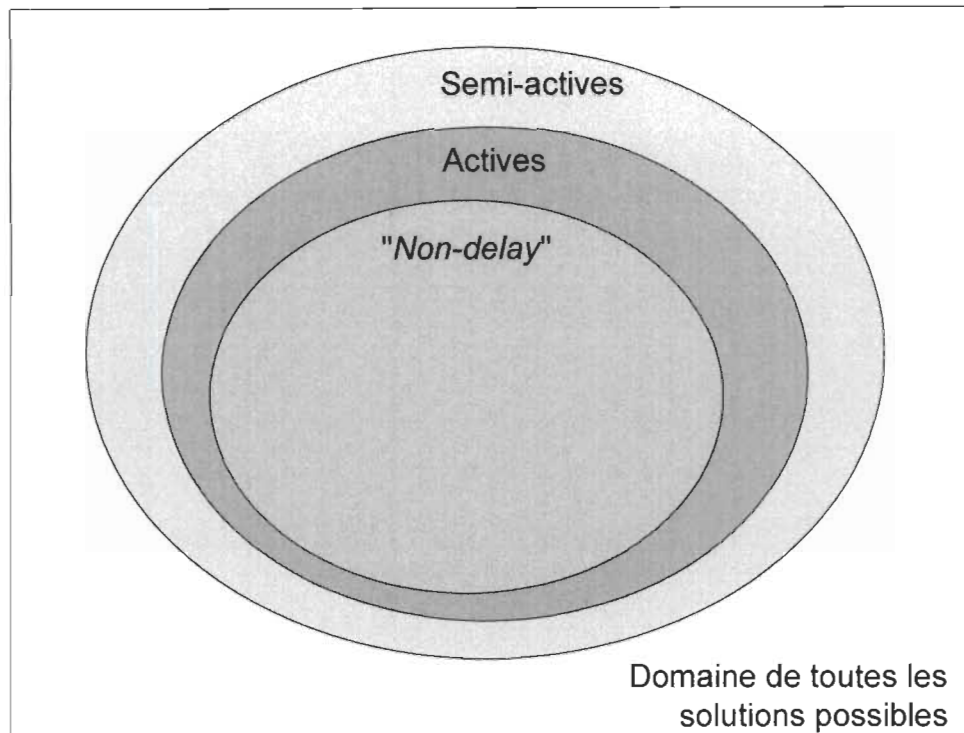


Figure 8. Types de calendriers et optimalité de l'ordonnancement

Pour départager l'opération à insérer dans le calendrier de production parmi les opérations éligibles (planifiables), des règles de priorités doivent être établies. Il existe une infinité de règles de priorité qu'on peut utiliser selon les performances désirées (Rheault, Drolet, et Abdunour, 1996b). L'annexe B liste les plus populaires. Ainsi, la règle "SPT" (*Shortest Processing Time*) priorise les ordres de fabrication qui ont le plus petit temps de fabrication, ce qui favorise une production efficace, i.e qui favorise l'élimination du gaspillage et la réduction des coûts, tandis que PAPS (*FCFS* ou *First Come First Serve*) exécute les commandes dans l'ordre d'entrée, ce qui favorise une production efficace, i.e. qui répond aux besoins en termes de quantités et délais (Ruben, Mosier, et Mahmoodi, 1993). Dans un contexte de production à la commande et de JÂT, il est préférable de choisir des règles qui favorisent l'efficacité (Ruben, Mosier, et Mahmoodi, 1993). À noter que dans la pratique, ces règles sont souvent utilisées "en cascades".

#### 2.2.4 Contrôle du système

Le quatrième module doit maintenir le système aussi stable que possible en activant les modules appropriés seulement lorsque certaines variables d'écart dépassent des seuils préétablis par le gestionnaire afin de donner le niveau souhaité de sensibilité aux turbulences. Par exemple, si une nouvelle commande urgente survenait peu après une reconfiguration, on pourrait calculer le coût de manutention supplémentaire occasionné par le traitement de cette commande (variable d'écart), et selon le niveau d'écart par rapport au coût marginal total planifié (seuils), on pourrait

réactiver l'un ou l'autre des modules (ex : module d'ordonnancement seulement pour un faible écart, tous les modules pour un écart important).

Si les seuils sont trop faibles, la dynamique s'avérerait trop grande dans l'atelier. À l'opposé, si les seuils sont trop élevés, certaines occasions très profitables pourraient échapper au système (Rheault, Drolet, et Abdounour, 1995).

La détermination des seuils et des stratégies d'activation constituant le quatrième module est un champ de recherche pour lequel il reste beaucoup à faire (Rheault, Drolet, et Abdounour, 1996a).

### **2.3 Mesures de performances des systèmes de production**

Les mesures de performances sont nombreuses, complexes et souvent conflictuelles (French, 1982). Néanmoins, certains indicateurs de performance reconnus dans la littérature sont résumés dans le Tableau 4 .



Tableau 4  
Indicateurs de performances reconnus

Indicateur	Terminologie anglo-saxonne	Symbole
Temps de passage	Flow time*	$F_i$
Date de fin (ou date de terminaison)	Completion time	$C_i$
Temps d'attente	Waiting time	$W_{ik}$
Temps d'attente total	Total waiting time	$W_i$
Jeu	Lateness	$L_i$
Retard	Tardiness	$T_i$
Avance	Earliness	$E_i$
Nombre d'ordres de travail en retard	Number of tardy jobs	$n_T$
Non-utilisation**	Idle time	$I_i$
Nombre d'ordres de travail en attente ***	Number of jobs waiting	$N_w(t)$
Nombre d'ordres de travail en traitement ***	Number of jobs being processed	$N_p(t)$
Nombre d'ordres de travail terminées***	Number of completed jobs	$N_c(t)$
Nombre d'ordres de travail non terminées ***	Number of jobs unfinished	$N_u(t)$

Tiré de "Sequencing and Scheduling : An introduction to the Mathematics of the Job-Shop " (French, 1982).

\*Aussi nommée makespan dans la terminologie anglo-saxonne.

\*\* La non-utilisation moyenne et maximum se calcule sur l'ensemble des ressources, et non sur les ordres de travail, i.e. on calcule la somme pour chaque ressource, puis le maximum ou la moyenne pour l'ensemble des ressources.

\*\*\* On calcule la moyenne de l'intégrale de l'ensemble du calendrier.

N.B. : Traditionnellement, on cherche à minimiser toutes ces mesures, sauf  $N_p(t)$  qu'on cherche à maximiser. Cette difficulté peut tout de même être contournée en minimisant  $-N_p(t)$ . Notons par ailleurs que cette tactique n'est pas nécessairement souhaitable en Juste-À-Temps.

Par ailleurs, chaque mesure de performance peut être pondérée selon l'importance relative de ses constituantes. Par exemple, on peut calculer le retard moyen en pondérant le retard de chaque commande par la quantité commandée ou par la valeur de vente des commandes.

Enfin, la littérature admet certaines équivalences entre les mesures de performances, c'est-à-dire que lorsqu'un calendrier est optimal pour l'une des mesures, il l'est pour les autres. Ainsi, les mesures de performances suivantes sont équivalentes :

$$\bullet \quad \overline{F}, \overline{C}, \overline{W}, \overline{L}$$

$$\bullet \quad C_{\max}, \overline{N_p}, \overline{I}$$

$$\bullet \quad L_{\max}, T_{\max}$$

$$\bullet \quad \overline{N_u}, \overline{C}/C_{\max}$$

$$\bullet \quad \overline{N_w}, \overline{W}/C_{\max}$$

### 3 MÉTHODOLOGIE

La littérature identifie les étapes d'une recherche, plus particulièrement dans le cas d'analyses statistiques (Hicks, 1993) :

#### A) Expérience

1. Formulation du problème
2. Choix des variables dépendantes
3. Sélection des facteurs à faire varier (variables indépendantes)
4. Choix des niveaux de ces facteurs
  - Fixes ou aléatoires
  - Quantitatifs ou qualitatifs
5. Combinaison des niveaux des facteurs

#### B) Design

1. Nombre d'observations requises
2. Ordre (séquence) de la prise des données
3. Méthode de génération des nombres aléatoires à utiliser
4. Modèle mathématique à utiliser
5. Hypothèses à tester

#### C) Analyse

1. Collecte de données et traitement
2. Tests statistiques
3. Interprétation des résultats

La formulation du problème réside tout simplement dans les objectifs de l'étude énumérés à la section 1.2, p.2.

Le choix des variables dépendantes décrit à la section 3.1 repose en grande partie sur la revue de la littérature à ce sujet. Toutefois, des mesures équivalentes et des mesures précédemment non mentionnées sont considérées comme importantes, par mesure de prudence et souci du détail.

Le choix des variables indépendantes est expliqué à la section 3.1.2, p.35. Le lecteur pourra parallèlement se référer à la section sur la simulation informatique (section 3.2, p.57) pour mieux comprendre ces variables et leurs interactions.

Le choix des niveaux et des interactions est détaillé à la section 3.3, p.63. De plus, on y retrouve toutes les étapes du design en tant que tel. Il convient ici de rappeler que l'entreprise-type est une PME manufacturière soumise à un environnement turbulent et aménagée en ateliers spécialisés ou en cellules classiques. Le choix des niveaux est donc inspiré de certaines PME manufacturières membres de la Chaire Bombardier Sea-Doo/Ski-Doo en raison de l'accès à des données privilégiées, du contexte turbulent dans lequel elles évoluent souvent, et des conditions générales propices à l'implantation de cellules dynamiques.

Enfin, la partie sur l'analyse des résultats compose la dernière section de cette étude.

### **3.1 Définition des variables**

#### **3.1.1 Variables dépendantes**

Les variables dépendantes sont :

- le temps de passage
- le jeu
- le retard
- le niveau d'encours
- le taux d'utilisation des ressources
- le coût de manutention interzone et le coût de configuration (dont la somme constitue le coût marginal total)

Ces variables sont collectées pour chaque cas généré.

##### **3.1.1.1 Temps de passage**

La réduction des temps de passage contribue à maintenir la clientèle, voire même à l'augmenter, grâce à une réponse rapide aux demandes. De plus, des temps de passage réduits favorisent un faible niveau d'encours, des taux d'utilisation élevés, et la décongestion (fluidité) du système.

Les mesures basées sur les temps de passage (moyenne, écart-type, maximum) sont calculées pour chaque cas (un cas correspond à un essai du plan expérimental), et pour chaque cas, elles se basent sur tous les lots de production complétés. Pour chacun de ces lots, les temps sont mesurés entre le début de la première étape (début de l'opération de la première pièce du lot sur la première machine requise par la gamme de fabrication) et la fin de la dernière étape (fin de l'opération de la dernière pièce du lot sur la dernière machine requise par la gamme de fabrication). Ces temps sont pondérés par la quantité de chaque lot dans les calculs des mesures de performance.

La moyenne des temps de passage pour un cas donné correspond donc à l'équation suivante :

$$\bar{x} = \frac{\sum f_i x_i}{\sum f_i}$$

Le calcul de la variance des temps de passage autour de la moyenne pour les valeurs pondérées des temps de passage des lots est donnée par l'équation suivante :

$$s^2 = \frac{\sum f_i x_i^2 - (\sum f_i x_i)^2 / \sum f_i}{\sum f_i - 1}$$

Où  $i$  : une observation, i.e. un lot de production complété

$x_i$  : la valeur pour l'observation "i", i.e. fin de la dernière étape - début de la première étape, pour un lot de production complété

$f_i$  : la pondération pour l'observation "i", i.e. la quantité de pièces du lot de production "i", donc :

$\sum f_i$  : la quantité totale de pièces provenant des lots complétés (pour un cas donné)

Le tableau suivant présente un exemple de calcul de la moyenne et de la variance du temps de passage (données reprises de l'exemple de la Figure 5, avec fractionnement de la commande B tel qu'illustré à la Figure 6, et ajout de la commande D).

Tableau 5  
Exemple de calcul de la moyenne et de la variance du temps de passage

(1)	(2)	(3)	(4)	(5)	(6)	(7)	(8) = (5)*[(7)-(6)]	(9) = (5)*[(7)-(6)] <sup>2</sup>
Commandes			Lots de production				$f_i x_i$	$f_i (x_i)^2$
No.	Qté	Due	No.	Qté	Début	Fin	(Col5)*((Col 7)-(Col 6))	(Col5)*[(Col7)-(Col6)] <sup>2</sup>
A	30	70	1	30	0	60	30*(60-0) = 1 800**	30*(60-0) <sup>2</sup> = 108 000
B	50	80	1	25	0	50	1 250	62 500
			2	25	50	100	1 250	62 500
C	70	90	1	70	0	102	7 140	728 280
D	60	120	1	40	70	110	1 600	64 000
			2 *	20	90	Non-complété		
Total = 190							Total = 13 040	Total = 1 025 280

\* Le lot # 2 de la commande D est exclu des calculs car il n'est pas complété, mais le lot #1 est inclus.

\*\* C'est l'écart entre la fin et le début de fabrication qui fait office de valeur observée ( $x_i$ ).

Le temps de passage moyen des lots correspond donc à :

$$13\,040/190 = 68.6 \text{ minutes}$$

La variance (pondérée) autour du temps de passage moyen correspond à :

$$\frac{1\,025\,280 - 13\,040^2/190}{(190-1)} = 689.5 \text{ (ou un écart-type de 26.26 minutes)}$$

Enfin, le temps de passage maximal ( $\max(x_i)$ ) est celui observé pour le lot #1 de la commande C (un seul lot pour cette commande, en fait), soit 102 minutes.

### 3.1.1.2 Jeu

Le jeu reflète la conformité du calendrier par rapport aux dates promises. Cet indice de performance est donc lui aussi relatif au service à la clientèle, mais traduit par la même occasion les inventaires de produits finis. En Juste-À-Temps, la réduction du jeu est un facteur particulièrement important.

Les mesures se rapportant au jeu sont calculées pour chaque cas, et pour chaque cas, elles se basent sur tous les *lots de production complétés*. Pour chacun de ces lots, les écarts absolus sont mesurés entre les dates dues de la commande et la fin de la dernière étape du lot. Ces temps sont pondérés par la quantité de chaque lot dans les calculs des mesures de performance.

Les variables utilisées dans les équations mentionnées précédemment sont donc :

- $i$  : une observation, i.e. un lot de production complété
- $x_i$  : la valeur pour l'observation "i", i.e. valeur absolue de "fin de la dernière étape du lot - date due de la commande", pour un lot de production complété
- $f_i$  : la pondération pour l'observation "i", i.e. la quantité de pièces du lot de production "i", donc :
- $\sum f_i$  : la quantité totale de pièces provenant des lots complétés (pour un cas donné)

Le tableau suivant présente un exemple de calcul de la moyenne et de la variance du jeu (données reprises du tableau précédent).

Tableau 6  
Exemple de calcul de la moyenne et de la variance du jeu

(1)	(2)	(3)	(4)	(5)	(6)	(7)	(10) = (5)*  (7)-(3)	(11) = (5)*  (7)-(3)  <sup>2</sup>
Commandes			Lots de production				$f_i x_i$	$f_i (x_i)^2$
No.	Qté	Due	No.	Qté	Début	Fin	(Col5)*  (Col 7)-(Col 3)	(Col5)*  (Col 7)-(Col 3)  <sup>2</sup>
A	30	70	1	30	0	60	30*  60-70  = 300**	30*  60-70  <sup>2</sup> = 3 000
B	50	80	1	25	0	50	750	22 500
			2	25	50	100	500	10 000
C	70	90	1	70	0	102	840	10 080
D	60	120	1	40	70	110	400	4 000
			2 *	20	90	Non-complété		
Total = 190							Total = 2 490	Total = 49 580

\* Le lot # 2 de la commande D est exclu des calculs car il n'est pas complété, mais le lot #1 est inclus.

\*\* C'est l'écart entre la fin de fabrication et la date due qui fait office de valeur ( $x_i$ ).

Le jeu moyen des lots correspond donc à :

$$2\,490/190 = 13.1 \text{ minutes}$$

La variance (pondérée) autour du jeu moyen correspond à :

$$\frac{49\,580 - 2\,490^2/190}{(190-1)} = 89.7 \text{ (ou un écart-type de 9.47 minutes)}$$

Enfin, le jeu maximal est établi à partir du jeu des *commandes*. Le jeu pour une commande correspond à la somme des jeux des lots de production nécessaires à la réalisation de cette commande, pondérés par l'importance relative de la taille des lots dans la taille de la commande. Le tableau suivant illustre un exemple de calcul du jeu maximal.

Tableau 7  
Exemple de calcul du jeu maximal

(1)	(2)	(3)	(4)	(5)	(6)	(7)	(10) = (5)*   (7)-(3)	(12) = $\Sigma$ (Jeu commande)
Commandes			Lots de production				$f_i x_i$	
No.	Qté	Due	No.	Qté	Début	Fin	(Col5)*   (Col 7)-(Col 3)	$\Sigma$ (Col10) <sub>commande</sub> / (Col2)
A	30	70	1	30	0	60	30*   60-70   = 300	300/30 = 10
B	50	80	1	25	0	50	750	(750+500)/50 = 25
			2	25	50	100	500	
C	70	90	1	70	0	102	840	12
D	60	120	1	40	70	110	400	6.7
			2 *	20	90	Non-complété		

\* Le lot # 2 de la commande D est exclu des calculs car il n'est pas complété, mais le lot #1 est inclus.

En l'occurrence, le jeu maximal est celui observé pour la commande B, soit 25 minutes.

### 3.1.1.3 Retard

Souvent, les commandes en retard entraînent des pénalités contractuelles élevées ou même la perte de clients, alors que les commandes en avance entraînent de faibles pénalités, voire même des primes. C'est pourquoi il est utile de considérer distinctement les écarts entre les dates de complétion ultérieures et les dates promises.

Les mesures basées sur les retards sont calculées de la même façon que pour celles basées sur le jeu, sauf lorsque le lot de production est complété avant la date due de la commande (livré en temps), où l'on considère la valeur  $x_i = 0$ .

Le tableau suivant illustre un exemple de calcul du retard moyen et de sa variance.

Tableau 8  
Exemple de calcul du retard moyen et de sa variance

(1)	(2)	(3)	(4)	(5)	(6)	(7)	(13) =(5)*MAX{0,(7)-(3)}	(14) =(5)*MAX{0,(7)-(3)} <sup>2</sup>
Commandes			Lots de production				f <sub>i</sub> x <sub>i</sub>	f <sub>i</sub> (x <sub>i</sub> ) <sup>2</sup>
No.	Qté	Due	No.	Qté	Début	Fin	(Col5)*MAX{0,(Col 7)-(Col 3)}	(Col5)*MAX{0,(Col 7)-(Col 3)} <sup>2</sup>
A	30	70	1	30	0	60	30*MAX{0,(60-70)}= 0	30*MAX{0,(60-70)} <sup>2</sup> = 0
B	50	80	1	25	0	50	0	0
			2	25	50	100	500	10 000
C	70	90	1	70	0	102	840	10 080
D	60	120	1	40	70	110	0	0
			2 *	20	90	Non-complété		
Total = 190							Total = 1 340	Total = 20 080

\* Le lot # 2 de la commande D est exclu des calculs car il n'est pas complété, mais le lot #1 est inclus.

Le retard moyen des lots correspond donc à :

$$1\,340/190 = 7.0 \text{ minutes}$$

La variance (pondérée) autour du retard moyen correspond à :

$$\frac{20\,080 - 1340^2/190}{(190-1)} = 56.2 \text{ (ou un écart-type de 7.50 minutes)}$$

Enfin, le retard maximal est établi à partir du retard des commandes. Le retard pour une commande correspond à la somme des retards des lots de production nécessaires à la réalisation de cette commande, pondérée par l'importance de la taille des lots dans la taille de la commande. Le tableau suivant illustre un exemple de calcul du retard maximal.

Tableau 9  
Exemple de calcul du retard maximal

(1)	(2)	(3)	(4)	(5)	(6)	(7)	(13) = (5)*MAX{0,(7)-(3)}	(15) = $\Sigma$ (Jeu commande)
Commandes			Lots de production				$f_i x_i$	
No.	Qté	Due	No.	Qté	Début	Fin	(Col5)*MAX{0,(Col 7)-(Col 3)}	$\Sigma$ (Col10) <sub>commande</sub> /(Col2)
A	30	70	1	30	0	60	30*MAX{0,(60-70)} = 0	0/30 = 0
B	50	80	1	25	0	50	0	(0+500)/50 = 10
			2	25	50	100	500	
C	70	90	1	70	0	102	840	12
D	60	120	1	40	70	110	0	0
			2 *	20	90	Non-complété		

\* Le lot # 2 de la commande D est exclu des calculs car il n'est pas complété, mais le lot #1 est inclus.

En l'occurrence, le retard maximal est celui observé pour la commande C, soit 12 minutes.

On peut aussi calculer les mesures basées sur l'avance de façon inverse à celles basées sur le retard, i.e. que lorsque le lot de production est complété *après* la date due de la commande (non livré en temps), on considère la valeur  $x_i = 0$ .



### 3.1.1.4 Niveau d'encours

La réduction des niveaux d'encours vise à minimiser les coûts d'immobilisation des stocks et les coûts indirects qui y sont associés, ainsi qu'à réduire la congestion du système.

L'équation originale pour calculer le niveau d'encours est ;

$$\bar{j} = \frac{1}{b-a} \int_a^b J(t) \partial t$$

où :  $J(t)$  : le nombre d'ordres de fabrication dans le système au temps  $t$

$a$  : le début de la période considérée

$b$  : la fin de la période considérée

L'intégrale a été modifiée, et cette modification se résume en trois points :

- considérer le nombre de pièces plutôt que le nombre d'ordres de fabrication (ce qui donne un meilleur niveau de "sensibilité")
- délimiter des intervalles à l'aide de bornes temporelles correspondant aux débuts et fins de la première et dernière étape de chaque lot de production dont il a été traité plus haut
- considérer la progression des encours en calculant la pente entre les intervalles (basée sur l'hypothèse des temps d'opération constants)

La Figure 9 illustre la progression du niveau d'encours pour l'exemple illustré précédemment (voir Figure 5, p.16, avec la commande B fractionnée, tel qu'illustré à la Figure 6, p.17). La commande C est illustrée de façon plus détaillée, et on remarque que l'avancement des encours au sein de l'atelier entre les étapes intermédiaires (ex : C2 à C4) n'est pas considéré ; seules la première et la dernière étape sont considérées.

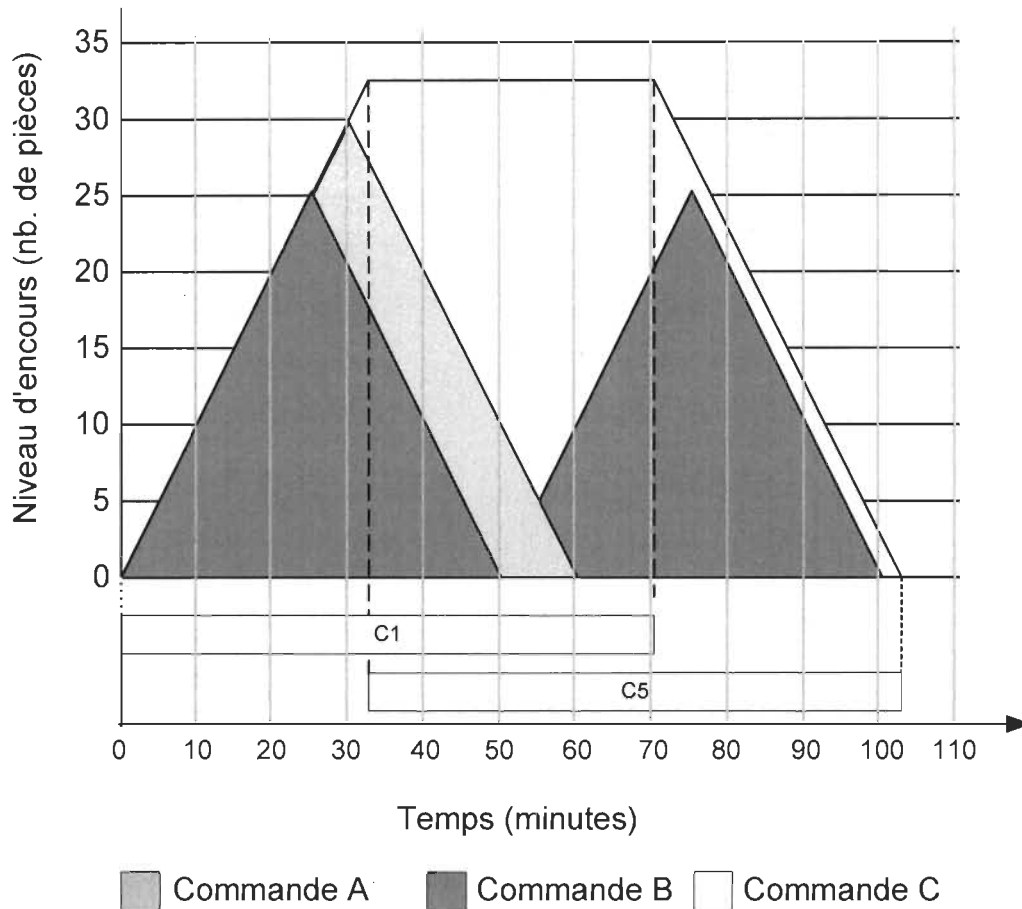


Figure 9. Exemple de progression du niveau d'encours

Pour les commandes A et B, il n'y a pas de plateau, puisque la dernière étape de fabrication débute au même moment où la première étape se termine, tandis que pour la commande C, il y a un plateau pour la période où la première et la dernière étape se chevauchent (entre la 31<sup>e</sup> et la 70<sup>e</sup> minute). L'encours moyen pour une commande correspond à l'aire sous la courbe divisé par le temps total de maintien et est fonction des temps d'opération respectifs de ces deux étapes :

- la pente entre l'état initial et le début de l'étape finale correspond à l'inverse du temps d'opération de la première étape.  $(1/Top_1 - 0)$  ; l'aire sous la courbe pour cet intervalle est de  $((1/1 - 0) \cdot (31-0)) \cdot (31-0)/2 = 480.5$
- la pente entre le début de la dernière étape et la fin de la première étape correspond à la différence entre les inverses des temps d'opération de ces deux étapes  $(1/Top_1 - 1/Top_2)$ . Dans l'exemple, la pente est nulle car les temps sont égaux ; la pente est aussi nulle s'il y a un temps d'attente entre la fin de la première étape et le début de la dernière étape). L'aire sous la courbe pour cet intervalle est de  $31 \cdot (70-31) = 1\,209$
- la pente entre la fin de la première étape et la fin de la dernière étape correspond au temps d'opération de la dernière étape, en valeur négative  $(0 - 1/Top_2)$  ; l'aire sous la courbe pour cet intervalle est de 480.5

Pour la commande C, le niveau d'encours moyen serait donc de :

$$(480.5 \times 2 + 1\,209) / (101 - 0) = 21.5 \text{ pièces}$$

En reprenant les données de la Figure 9, et en supposant qu'il s'agit là de l'ensemble du cas étudié et que la fin du cas étudié se termine avec la dernière commande terminée, le niveau d'encours moyen global sera calculé comme suit :

Tableau 10  
Calcul du niveau d'encours moyen

#Com	#Lot	Borne Début	Encours Début	Borne Fin	Encours Fin	Aire sous la courbe (pces-minutes)
A	1	0	0	30	30	(30-0)*(30-0)/2=450
		30	30	60	0	450
B	1	0	0	25	25	312.5
		25	25	50	0	312.5
	2	50	0	75	250	312.5
		75	25	100	0	312.5
C	1	0	0	31	31	480.5
		31	31	70	31	1216
		70	31	101	0	480.5
Min : 0			Max:101		Total :4 320	

Note : Nous utilisons l'exemple précédent, avec la commande B fractionnée : la commande B fabriquée en un seul lot aurait généré un niveau d'encours moyen beaucoup plus élevé.

Le niveau d'encours moyen est donc ;  $4\,320 / (101 - 0) = 42.8$  pièces

Il s'agit de la moyenne du niveau d'encours, constitué des encours partout dans l'atelier, pondérée par la durée de maintien de chacun de ces encours.

Pour calculer la dispersion du niveau d'encours, on considère l'encours moyen sur plusieurs périodes (horizons de réévaluations) de durées égales<sup>8</sup>, pour l'ensemble du cas. Par exemple, si on divise le cas illustré à la Figure 9 en périodes de 20 minutes, et qu'on calcule le niveau d'encours moyen sur chacune de ces périodes, on obtient le tableau suivant. Les cases grisées et italiques représentent des bornes temporelles définies non pas à cause d'un changement de pente dans la progression des encours, mais plutôt parce qu'il s'agit du début ou de la fin d'une période de 20 minutes. Ces bornes ont donc été insérées à travers les bornes déjà définies au tableau précédent.

<sup>8</sup> L'encours est généralement considéré comme une variable continue (rappelons que l'équation pour calculer l'encours moyen est une intégrale par rapport au temps). Ainsi, plus les observations sont instantanées, plus il y a d'observations pour une même période d'expérimentation, et plus la mesure de la variabilité est élevée. Pour éliminer ce biais, la méthodologie propose d'utiliser la même période d'expérimentation et de diviser en un même nombre de périodes tous les essais pour calculer la variabilité pour tous les cas.

Tableau 11  
Exemple de calcul de la variabilité de l'encours

(1)	(2)	(3)	(4)	(5)	(6)*	(7)**
Commande	Borne Début	Encours Début	Borne Fin	Encours Fin		Moyenne Période
A	0	0	20	20	200	3*200/20=30
B	0	0	20	20	200	
C	0	0	20	20	200	
A	20	20	30	30	250	71.73
B	20	20	25	25	112.5	
C	20	20	31	31	280.5	
B	25	25	40	10	262.5	
A	30	30	40	20	250	
C	31	31	40	31	279	
A	40	20	60	0	200	46.25
B	40	10	50	0	50	
C	40	31	60	31	620	
B	50	0	60	10	50	
B	60	10	75	25	262.5	47.25
C	60	31	70	31	310	
C	70	31	80	21	260	
B	75	25	80	20	112.5	
B	80	20	100	0	200	21
C	80	21	100	1	220	
Min :	0	Max :	1001	Écart-type		24.21

\* Col 6 =  $\frac{1}{2} [(Col3)+(Col5)] * [(Col4)-(Col2)]$ , ce qui correspond à l'aire sous la courbe (pces-min)

\*\* Col 7 =  $\sum (Col\ 6)_{Période} / [MAX(Col4)_{Période} - MIN(Col2)_{Période}]$ , i.e. l'encours moyen pondéré.

Note : La dernière période (100<sup>e</sup> à 101<sup>e</sup> minute) est exclue du calcul de l'écart-type.

L'encours maximal correspond au plus haut niveau d'encours moyen enregistré parmi tous les horizons de réévaluation<sup>9</sup>. Cette méthode a la faiblesse de "noyer" les pointes ponctuelles dans le calcul de l'encours moyen pondéré au cours d'une période, mais elle représente bien les hausses significatives par leur durée. Par exemple, en examinant la Figure 9, on constate que le plus haut niveau d'encours est observé à la 30<sup>e</sup> minute, et correspond à la somme des encours pour les 3 commandes à ce moment précis, soit : 30 + 20 + 30 = 80 pièces, alors que selon le tableau précédent, l'encours maximal est observé pour la deuxième période de 20 minutes et est de 71.73 pièces.

### 3.1.1.5 Taux d'utilisation des ressources

Généralement, on cherche à maximiser le taux d'utilisation des ressources, particulièrement pour les équipements dispendieux, car on désire rentabiliser l'investissement. Un taux d'utilisation

<sup>9</sup>L'horizon de réévaluation est une valeur seuil qui détermine le temps maximal (et effectif dans le cas présent) entre deux réévaluations.

élevé des équipements goulots est particulièrement souhaitable car il reflète l'utilisation du système en entier.

Les mesures basées sur les taux d'utilisation sont calculées pour chaque cas, et pour chaque cas, elles se basent sur tous les *lots, complétés ou non*. Pour l'utilisation moyenne on calcule la somme des temps de fabrication de tous les OF du cas, divisé par le temps total disponible, qui lui, correspond au nombre de machines multiplié par la durée totale du cas. En reprenant les données de la Figure 5 (p.16), on peut calculer les taux d'utilisation comme suit :

Tableau 12  
Taux d'utilisation

Commande (No.)	Lot (No.)	Temps d'opération total (minutes/pièce)	Quantité (pièces)	Temps total (Minutes)
A	1	4	30	120
B	1	3	25	75
	2	3	25	75
C	1	5	70	350
				Total : 620 min.

En considérant la fin de la commande C comme la fin du cas, le taux d'utilisation moyen pour l'exemple est de :

$$620/(10 \times (101-0)) = 61.39\%$$

Le taux d'utilisation minimum est mesuré pour la machine la moins utilisée sur la durée totale d'expérimentation. Selon l'exemple, l'utilisation minimale serait pour la machine #10 et correspondrait à :

$$0/(101-0) = 0,0\% \text{ (ce qui risque peu d'arriver avec un cas plus élaboré)}$$

La variance et l'écart-type sont mesurés entre les taux d'utilisation moyens des machines. D'après l'exemple, l'écart-type du taux d'utilisation est de 30.0% entre les machines.

### 3.1.1.6 Coût marginal total

Somme de tous les coûts entraînés par les manutentions et les configurations, sur l'ensemble du cas. Il correspond à l'équation suivante :

$$\text{Coût Marginal Total} = \sum_c \left( \sum_k \sum_z (CG_{kzc} * X_{kzc}) + \sum_p \sum_k \sum_l (CM_{pkl} * E_{pklc} * D_{klc}) \right)$$

où :

- $c$  : une configuration (i.e. période correspondant à un horizon de réévaluation)
- $k$  : une machine (poste de travail)
- $l$  : la machine suivante
- $z$  : une zone
- $p$  : un produit
- $X_{kzc}$  : variable binaire valant 1 si la machine  $k$  est dans la zone  $z$  à la configuration  $c$ , 0 autrement
- $CG_{kzc}$  : le coût de configuration du poste de travail  $k$  dans la zone  $z$  à la configuration  $c$
- $CM_{pkl}$  : le coût de manutention d'un lot de transfert du produit  $p$  entre les postes  $k$  et  $l$  par unité de distance
- $E_{pklc}$  : le nombre d'échanges du produit  $p$  entre les postes  $k$  et  $l$  au cours de la configuration  $c$
- $D_{klc}$  : la distance entre la zone contenant le poste de travail  $k$  et la zone contenant le poste de travail  $l$  à la configuration  $c$

### 3.1.2 Variables indépendantes

Les variables indépendantes modélisées concernent :

- la gestion du système
- les ressources
- le site de production (usine)
- les produits
- les gammes

Ces variables sont générées pour chaque cas étudié. Bien sûr, il serait impensable de modéliser tous les aspects de la réalité, (par exemple les taux de pannes ou les temps de mise en course). À cet effet, le lecteur peut se référer aux hypothèses de départ (p.3).

#### 3.1.2.1 Gestion du système

La gestion du système touche les aspects suivants :

- la priorisation des commandes
- le contrôle du lancement en production

- la capacité des ressources
- le fractionnement des commandes en lots de production
- l'ordonnancement de la production

### *La priorisation des commandes*

La priorisation des commandes s'effectue en deux temps ;

- d'abord sur un horizon plus long (ex : 1 mois) pour départager les commandes prioritaires du carnet de commandes (et ainsi déterminer celles qui seront considérées dans le modèle d'optimisation, pour les SMCD), puis,
- lors de l'ordonnancement, pour départager les OF en compétition pour l'obtention des ressources (machines).

Les priorités peuvent se baser sur des règles et seuils différents d'un niveau à l'autre. Par exemple, les règles de priorité utilisées au premier niveau peuvent être basées sur un critère d'efficacité (ex : par dates dues, DDUE), tandis que les règles du deuxième niveau favoriseraient l'efficacité (SPT).

Au premier niveau, cet aspect dicte dans quel ordre les commandes entrent dans la matrice De-À des échanges intermachines, et influe donc sur la configuration. L'exemple suivant introduit les notions de priorisation. D'abord, considérons le Tableau 13, qui résume le carnet de commande à un temps donné.

Tableau 13  
Carnet de commande

Commande	Produit	Quantité	Date de prise de commande	Date due	Priorité PAPS	Priorité DDUE
A	1	300	01/05/98	07/05/98	1	3
B	2	500	01/05/98	11/05/98	1	5
C	3	700	02/05/98	16/05/98	3	8
D	4	50	03/05/98	04/05/98	4	1
E	5	100	04/05/98	06/05/98	5	2
F	6	150	06/05/98	09/05/98	6	4
G	7	250	08/05/98	12/05/98	7	6
H	3	600	11/05/98	23/05/98	8	10
I	4	20	14/05/98	14/05/98	9	7
J	5	50	18/05/98	19/05/98	10	9
K	6	80	22/05/98	23/05/98	11	11
L	7	250	26/05/98	31/05/98	12	12

Plusieurs observations méritent d'être soulignées :

- il y a plusieurs commandes pour un même produit
- l'écart entre la date de prise de commande et la date promise est variable (notion d'urgence des commandes)
- l'ordre des priorités est différent selon le critère de priorisation

- certaines commandes ont le même degré de priorité au départ selon un critère donné (ex : commandes A et B avec PAPS) ; on pourrait utiliser un deuxième niveau pour départager (ex : commande A plus urgente selon DDUE). En dernier recours, la priorité est départagée aléatoirement.

Avant de poursuivre, il est nécessaire d'apporter quelques précisions sur les gammes de fabrication des produits de ce carnet de commandes. Le Tableau 14 résume ces données. À noter que des gammes alternatives et machines alternatives pourraient aussi être définies, ce que nous ne ferons pas pour garder l'exemple relativement simple.

Tableau 14  
Gammes de fabrication et temps d'opération

Produit	(#Machine, Temps d'opération)
1	(2,1) , (5,1) , (7,1) , (2,1)
2	(3,1) , (6,1) , (3,1)
3	(1,3) , (4,1) , (8,1) , (9,1) , (5,1)
4	(10,6) , (9,4) , (8,2)
5	(6,2) , (7,4)
6	(2,4) , (3,2) , (4,2) , (1,2) , (10,6)
7	(2,2) , (6,6) , (7,4) , (10,2)

Note : Les temps d'opération sont en minutes

De plus, supposons un horizon de configuration<sup>10</sup> (voir p.54) de 2 500 minutes avec un taux d'utilisation anticipé de 80% (donc 2 000 minutes), ce qui signifie que la charge totale planifiée pour une machine ne pourra pas excéder ce temps. Le Tableau 15 illustre l'introduction séquentielle des commandes selon un ordre PAPS, tandis que le Tableau 16 introduit plutôt les commandes selon un ordre DDUE.

La charge (partie gauche des tableaux) est calculée pour la commande indiquée dans la marge (1<sup>ère</sup> colonne à gauche). Par exemple, au Tableau 15, la commande A (300 pièces du produit #1) requiert 2 x 1 minute/pièce sur la machine #2, donc un total de 300 x 2 = 600 minutes.

La charge cumulative (partie droite des tableaux) est calculée suite à l'introduction de la commande indiquée dans la marge (1<sup>ère</sup> colonne à gauche). Par exemple, la charge de la commande C sur la machine #5 (700 pièces du produit #3 requérant 1 minutes/pièce = 700 minutes) s'ajoute à la charge déjà planifiée sur cette machine, soit 300 minutes, pour un total de 1 000 minutes.

La colonne Charge MAX donne la charge cumulative maximum, pour s'assurer qu'aucune des machines n'est chargée au-delà de la capacité permise, soit 2 000 minutes. Par exemple, la commande C entière ne respecte pas cette contrainte (max = 2 100 minutes). On corrige donc sur la ligne suivante avec une commande C' partielle de 667 pièces qui respecte la capacité (max

<sup>10</sup> Pour une meilleure compréhension des différents types d'horizons, voir la Figure 10, p.43 .



= 2 000). Pour les commandes requérant du temps sur des machines déjà saturées (ex : commande F), la quantité révisée sera égale à 0.

Tableau 15  
Introduction des commandes selon l'ordre PAPS

# Com	Nb. Pces	Charge (x 100 minutes)										Charge cumulative (x 100 minutes)										Charge MAX
		M1	M2	M3	M4	M5	M6	M7	M8	M9	M10	M1	M2	M3	M4	M5	M6	M7	M8	M9	M10	
A	300		6			3		3				0	6	0	0	3	0	3	0	0	0	6
B	500			10			5					0	6	10	0	3	5	3	0	0	0	10
C	700	21			7	7			7	7		21	6	10	7	10	5	3	7	7	0	21
C'	667	20			7	7			7	7		20	6	10	7	10	5	3	7	7	0	20
D	50								1	2	3	20	6	10	7	10	5	3	8	9	3	20
E	100						2	4				20	6	10	7	10	7	7	8	9	3	20
F	150	3	6	3	3						9	23	12	13	10	10	7	7	8	9	12	23
F'	0											20	6	10	7	10	7	7	8	9	3	20
G	250		5				15	10			5	20	11	10	7	10	22	17	8	9	8	22
G'	217		4				13	9			4	20	10	10	7	10	20	16	8	9	7	20
H	600	18			6	6			6	6		38	10	10	13	16	20	16	14	15	7	38
H'	0											20	10	10	7	10	20	16	8	9	7	20
I	20								0,4	0,8	1,2	20	10	10	7	10	20	16	8	9	9	20
J	50						1	2				20	10	10	7	10	21	18	8	9	9	21
J'	0											20	10	10	7	10	20	16	8	9	9	20
K	80	1,6	3,2	1,6	1,6						4,8	22	14	12	8	10	20	16	8	9	13	22
K'	0											20	10	10	7	10	20	16	8	9	9	20
L	250		5				15	10			5	20	15	10	7	10	35	26	8	9	14	35
L'	0											20	10	10	7	10	20	16	8	9	9	20

Tableau 16  
Introduction des commandes selon l'ordre DDUE

# Com	Nb. Pces	Charge (x 100 minutes)										Charge cumulative (x 100 minutes)										Charge MAX
		M1	M2	M3	M4	M5	M6	M7	M8	M9	M10	M1	M2	M3	M4	M5	M6	M7	M8	M9	M10	
D	50								1	2	3	0	0	0	0	0	0	0	1	2	3	3
E	100						2	4				0	0	0	0	0	2	4	1	2	3	4
A	300		6			3		3				0	6	0	0	3	2	7	1	2	3	7
F	150	3	6	3	3						9	3	12	3	3	3	2	7	1	2	12	12
B	500			10			5					3		13	3	3	7	7	1	2	12	13
G	250		5				15	10			5	3	17	13	3	3	22	17	1	2	17	22
G'	217		4				13	9			4	3	16	13	3	3	20	16	1	2	16	20
I	20								0,4	0,8	1,2	3	16	13	3	3	20	16	1	3	18	Idem
C	700	21			7	7			7	7		24	16	13	10	10	20	16	8	10	18	24
C'	567	17			6	6			6	6		20	16	13	9	9	20	16	7	8	18	20
J	50						1	2				20	16	13	9	9	21	18	7	8	18	21
J'	0											20	16	13	9	9	20	16	7	8	18	20
H	600	18			6	6			6	6		38	16	13	15	15	20	16	13	14	18	38
H'	0											20	16	13	9	9	20	16	7	8	18	20
K	80	1,6	3,2	1,6	1,6						4,8	22	20	15	10	9	20	16	7	8	22	22
K'	0											20	16	13	9	9	20	16	7	8	18	20
L	250		5				15	10			5	20	21	13	9	9	35	26	7	8	23	35
L'	0											20	16	13	9	9	20	16	7	8	18	20

En comparant les deux tableaux précédents, on remarque que selon la règle "date due" on planifie la commande F en entier (150 pièces) au détriment de la commande C (C' = 567 pièces = 81% de la commande totale), tandis que selon la règle "premier arrivé, premier servi", on planifie presque toute la commande C (C' = 667 pièces = 95% de la commande totale), et la commande F n'est pas introduite. Par ailleurs, on remarque que les commandes H, J, K, et L sont écartées dans les deux cas, faute de capacité. Comme on ne retrouve le produit #6 que dans les commandes F et K, les échanges attribuables à ce produit (dans la matrice des échanges intermachines (voir exemple à la Figure 3, p.12)) seront nuls si on utilise la règle PAPS, favorisant une configuration répondant mieux aux cheminements des autres produits (mais occasionnant peut-être un retard sur la commande F, qui sera repoussée à la prochaine évaluation).

Au deuxième niveau, les règles utilisées, conjuguées au type de calendrier préconisé, influencent les performances. Cet aspect fait référence aux notions d'ordonnancement, que l'on a traitées à la section 2.2.3, p.15.

Mentionnons en dernier lieu que tant au premier qu'au deuxième niveau, de nombreux paramètres de contrôle pourraient être ajoutés, par exemple pour contrôler la taille des commandes partielles (pour éviter d'introduire des commandes de trop faible taille), ou encore pour éviter de prendre trop d'avance sur la production (pour éviter l'accumulation de stocks de produits finis). Toutefois, le choix des divers paramètres et leur effet combinatoire en fonction du contexte constitue un vaste champ d'étude en lui-même, dont l'approfondissement est laissé aux

recherches futures. Nous nous contentons ici de modéliser quelques paramètres jugés importants qui seront développés dans les prochaines sections.

### *Le contrôle du lancement en production*

Le contrôle du lancement en production est directement lié à la priorisation des commandes et vise à cesser d'introduire et de planifier les commandes au delà d'un certain seuil, par exemple les commandes dont la date promise est trop éloignée. En effet, il est inutile, peut-être même nuisible de planifier trop à l'avance ce qui risque de toute façon d'être changé dans un environnement difficilement prévisible. Les seuils peuvent toutefois différer d'un niveau de planification à l'autre.

Au niveau supérieur, le seuil affecte la correspondance entre les échanges "instantanés" (échanges sur de courtes périodes), et effectifs à posteriori. En définitive, le seuil du niveau supérieur agit sur la correspondance entre la solution d'aménagement et les besoins ponctuels.

Par exemple, en supposant que le carnet de commandes illustré au Tableau 13 soit effectif au 1 mai 1998 et une priorisation par dates dues (voir Tableau 16) on aurait pu bloquer toutes les commandes dont la date due était éloignée de plus de 7 jours, laissant ainsi plus de capacité libre pour l'introduction de commandes plus urgentes lors de la réévaluation du système, par exemple 3 jours plus tard (notion d'*horizon de réévaluation*). Le Tableau 17 illustre ce phénomène en comparant l'introduction par dates dues avec et sans seuil (seuil = 7 jours).

La "Date de l'événement" (2<sup>e</sup> colonne de gauche) marque l'arrivée d'une commande ou la date de réévaluation des priorités. On constate que l'ordre d'introduction des commandes (les deux colonnes de droite) diffère selon que l'on utilise ou non un seuil.

Par exemple, la commande C est inscrite au carnet de commandes le 2 mai 1998 ; elle est donc inconnue à l'évaluation #1 (1 mai 1998) ; la zone mesurant l'écart est donc grisée. À l'évaluation #2 (4 mai 1998), on mesure un écart de 12 jours par rapport à la date due (16 mai 1998), ce qui est trop élevé pour l'introduire avec un seuil de 7 jours, et il en va de même pour l'évaluation #3 (7 mai 1998), où on mesure un écart de 9 jours par rapport à la date due. La commande est enfin introduite à la 4<sup>e</sup> évaluation, où il ne reste que 6 jours pour la traiter dans les délais impartis ; l'écart est donc marqué en gras.

Tableau 17  
Introduction des commandes selon DDUE sans seuil et avec seuil

Évènement	Date de l'évènement	Date promise	Écart date due vs date de l'évaluation, à l'évaluation				Ordre <sup>2</sup> (Seuil)	
			#1	#2	#3	#4	Non	Oui
Commande A	01/05/98	07/05/98	6				1	1
Commande B	01/05/98	11/05/98	10	7			2	4
<b>Évaluation #1</b>	<b>01/05/98</b>							
Commande C	02/05/98	16/05/98		12	9	6	4	7
Commande D	03/05/98	04/05/98		0			3	2
Commande E	04/05/98	06/05/98		2			5	3
<b>Évaluation #2</b>	<b>04/05/98</b>							
Commande F	06/05/98	09/05/98			2		6	5
<b>Évaluation #3</b>	<b>07/05/98</b>							
Commande G	08/05/98	12/05/98				2	7	6
<b>Évaluation #4</b>	<b>10/05/98</b>							
<b>Évaluations suivantes</b>								
Commande H	11/05/98	23/05/98					8	9
Commande I	14/05/98	14/05/98					9	8
Commande J	18/05/98	19/05/98					10	10
Commande K	22/05/98	23/05/98					11	11
Commande L	26/05/98	31/05/98					12	12

Note : Ce tableau traduit les nouveaux flux, mais en réalité, les flux «résiduels» entraînés par les commandes déjà introduites mais non terminées sont aussi considérés.

On remarque qu'avec un seuil, on introduit (selon le critère de priorité retenu, en l'occurrence DDUE) les commandes qui passent sous le seuil, alors que sans seuil, toutes les commandes connues sont introduites selon le critère de priorité retenu. Pour l'exemple :

- la commande B est inscrite au carnet de commandes avant la première évaluation : elle est donc introduite dès la première évaluation sans seuil, mais avec un seuil, elle n'est introduite qu'à la deuxième évaluation.
- la commande C est inscrite au carnet de commandes entre la première et la deuxième évaluation : elle est donc introduite à la deuxième évaluation sans seuil, mais avec un seuil, elle n'est introduite qu'à la quatrième évaluation du carnet de commandes.

On comprendra que l'utilisation d'un seuil permet de garder une certaine «fluidité» du système, en réservant la capacité pour les commandes prioritaires qui entrent entre deux évaluations, créant ainsi un aménagement dynamique répondant mieux à des besoins immédiats. En faisant l'analogie à plus court terme, l'utilisation d'un seuil vise plutôt à éviter la congestion inutile du système lors de l'ordonnancement. D'ailleurs, il existe des recherches-synthèses intéressantes traitant de l'importance du contrôle de lancement en production en contexte d'ateliers spécialisés. (Bergamaschi, 1997 ; Wisner, 1995).

### *La capacité des ressources*

Le nombre de commandes qu'il est possible d'introduire est lié à l'horaire de travail et à l'horizon temporel considérés. Il s'agit là d'un point majeur car il influence directement l'importance des changements dans la matrice des échanges d'une évaluation à l'autre, et par conséquent la stabilité du système (Marcoux, Drolet, et Abdounour, 1997). Reprenons l'exemple et supposons que l'horizon de configuration de 2 500 minutes cité précédemment a été obtenu en considérant 1 semaine, avec un horaire de travail de 7 heures par jour, 6 jours/semaine ;

$$\text{Horizon}_{\text{configuration}} = 1 \text{ sem} \times 6 \text{ jrs/sem} \times 7 \text{ h/jr} \times 60 \text{ min/h} \approx 2\,500 \text{ minutes}$$

De façon analogue, on peut exprimer l'horizon de réévaluation de 3 jours cité précédemment en temps de travail. Plus précisément, on a calculé ;

$$\text{Horizon}_{\text{réévaluation}} = \frac{1}{2} \text{ sem} \times 6 \text{ jrs/sem} \times 7 \text{ h/jr} \times 60 \text{ min/h} \approx 1\,250 \text{ minutes}$$

Ajoutons que les différents horizons peuvent aussi être exprimés à partir de ratios entre ces horizons. Ici, on aurait ;

$$\text{Horizon}_{\text{réévaluation}} = \frac{1}{2} \times \text{Horizon}_{\text{configuration}}$$

Si le nombre de semaines ou la capacité par période (jrs/sem ou hres/jr) avait été plus long, plus de commandes (voire toutes les commandes) de l'exemple illustré précédemment auraient pu être introduites, et à l'inverse un horizon plus court aurait permis un moins grand nombre de commandes. Par contre, si plus de commandes avaient été introduites, la matrice des échanges aurait comporté plus de flux, et la solution d'aménagement aurait été moins axée en fonction des cheminements de produits spécifiques.

L'horizon doit donc être établi en fonction du niveau de planification. Nous y reviendrons plus loin. La Figure 10 illustre un exemple de l'interaction entre les horizons de configuration, de planification de réévaluation.

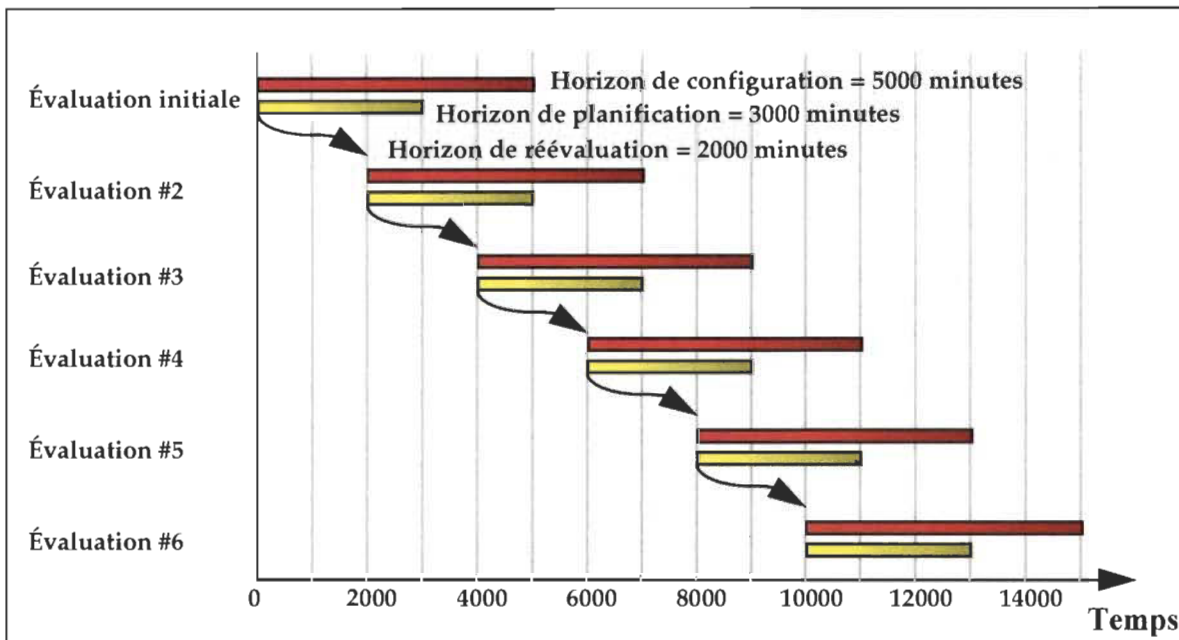


Figure 10. Horizons de configuration, de planification et de réévaluation

Les trois notions qui viennent d'être élaborées peuvent donc se définir :

**Horizon de configuration ( $H_c$ ) :** La période que l'on considère pour l'introduction des commandes dans le module de configuration (module #2), exprimée en temps de travail disponible.

**Horizon de planification ( $H_p$ ) :** La période que l'on considère pour l'introduction des commandes dans le module d'ordonnancement (module #3), exprimée en temps de travail disponible.

**Horizon de réévaluation ( $H_r$ ) :** Le temps écoulé entre deux évaluations du système, exprimé en temps de travail. Cet horizon correspond à l'inverse de la fréquence de réévaluation.

#### *Le fractionnement des commandes en lots de production*

Le fractionnement consiste à diviser les commandes pour les produire en plusieurs petits lots (voir Figure 6, p. 17). Cette stratégie peut améliorer les temps de réponse, réduire le niveau des stocks et les délais de livraison. Il convient toutefois d'établir clairement les politiques quant au ratio de fractionnement, ce qui dans la pratique dépend généralement des coûts de mise en course (ex : lot économique de fabrication). Ainsi, la stratégie contraire peut être préconisée (regroupement des commandes) afin de répartir les coûts fixes sur un plus grand volume.

Par ailleurs, il convient de bien distinguer entre l'introduction d'une commande partielle (voir commande C dans l'exemple à la page 39), qui intervient lors de l'évaluation du carnet de

commandes, et le fractionnement des commandes, qui n'intervient qu'au 2<sup>e</sup> niveau, après que la commande soit introduite (commande B fractionnée, p. 17)

### *L'ordonnancement de la production*

Le calendrier final dépend essentiellement de trois facteurs :

- a) le type de programmation (calendrier) utilisé,
- b) le sens du jalonnement, et
- c) les règles de priorité utilisées.

L'ordonnancement est directement lié au mode de production et au contexte manufacturier ; par exemple, une règle qui donne d'excellents résultats dans un certain contexte peut s'avérer tout à fait inappropriée ou même inapplicable dans un autre genre de contexte. On remarque tout de même que le calendrier de type "*non-delay*" et la règle SPT comme bris d'égalité donnent les meilleurs résultats dans un grand nombre de cas.

### 3.1.2.2 Produits

Le profil de la demande a été modélisé à l'aide des variables suivantes ;

- la variété des produits
- le volume de production
- les cycles de vie
- les délais de préavis

L'ensemble des caractéristiques décrites à propos des produits est présenté tel qu'illustré à la Figure 11 (pour un produit donné).

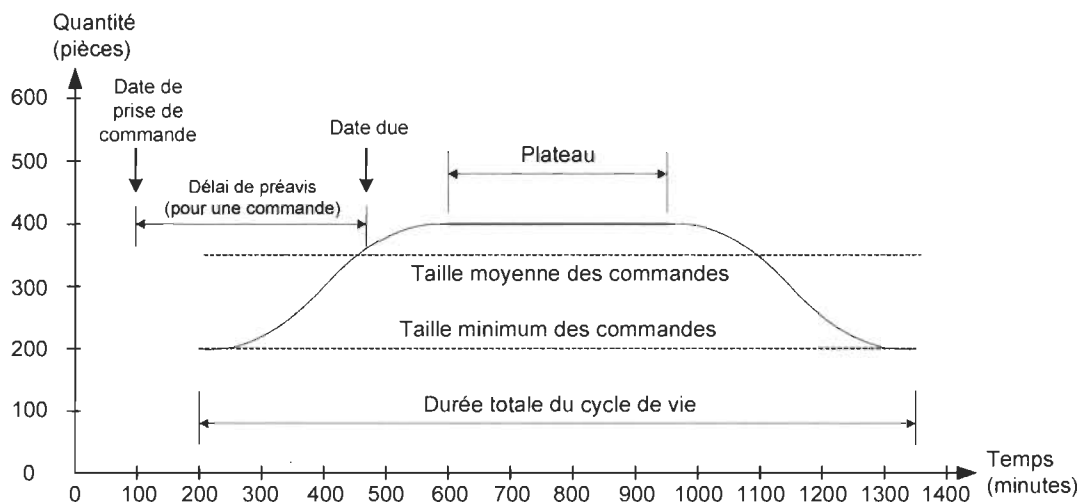


Figure 11. Schéma résumant les caractéristiques modélisées des produits

Dans l'exemple, on remarque les différents paramètres :

- début du cycle de vie : 200<sup>e</sup> minute

- durée totale du cycle de vie :  $1350 - 200 = 1100$  minutes
- durée du plateau :  $950 - 600 = 350$  minutes, i.e.  $350/1100 = 31.8\%$  de la durée totale du cycle de vie
- commande minimum : 200 pièces
- commande moyenne : 350 pièces
- délai de préavis : Date due - Date de prise de commande =  $500 - 100 = 350$  minutes (pour une commande en particulier)

### *La variété des produits*

On parle ici du nombre total de produits potentiels sur l'ensemble du cas. L'augmentation de la variété de produits contribue à la complexification des flux et au vieillissement des cellules et constitue par conséquent une mesure de turbulence.

### *Le volume de production*

Cet aspect est modélisé par la taille moyenne des commandes pour un produit. La moyenne est calculée sur l'ensemble du cycle de vie du produit. Avec la variété, il constitue une variable centrale dans le choix du mode de production.

### *Les cycles de vie*

Les cycles de vie sont modélisés par les éléments suivants :

- la durée totale du cycle de vie
- la durée du plateau (exprimée en proportion de la durée totale du cycle de vie)
- le début du cycle de vie

Bien qu'il s'agisse d'une représentation simplifiée des cycles de vies réels, celle-ci permet de modéliser les aspects essentiels de cycles de vies typiques en contexte de turbulence. Des cycles de vies courts (durée du cycle de vie, durée du plateau) et déphasés (début du cycle de vie) accélèrent le vieillissement des cellules, et l'importance de ce vieillissement est aussi fonction du volume et de la variété discutés plus haut.

### *Les délais de préavis*

Le délai de préavis correspond à l'écart temporel entre l'entrée d'une commande dans le carnet de commandes et sa date due, et elle traduit l'urgence des commandes. Cet aspect est modélisé comme "rigide" et ayant une liaison au produit car l'étude se consacre aux flux internes, bien qu'en réalité les dates dues sont (au moins en partie) négociables, selon le client, et/ou le vendeur, etc. En général, plus les délais sont serrés, et plus la planification détaillée (à court



terme) est bousculée, car plus grande est la proportion d'événements ayant une répercussion à court terme.

### 3.1.2.3 Gammes

Les gammes sont décrites par les aspects suivants ;

- le nombre de phases
- les temps d'opération à chaque phase

#### *Le nombre de phases*

Cette variable désigne le nombre de machines qui doivent être visitées pour la fabrication d'un produit donné. Des gammes très élaborées complexifient les flux, et à l'inverse des gammes simples minimisent l'effet du mode de production, et donc le potentiel de chevauchement des opérations rendu possible grâce à la proximité des machines. Les deux figures suivantes et le Tableau 18 illustrent ce phénomène.

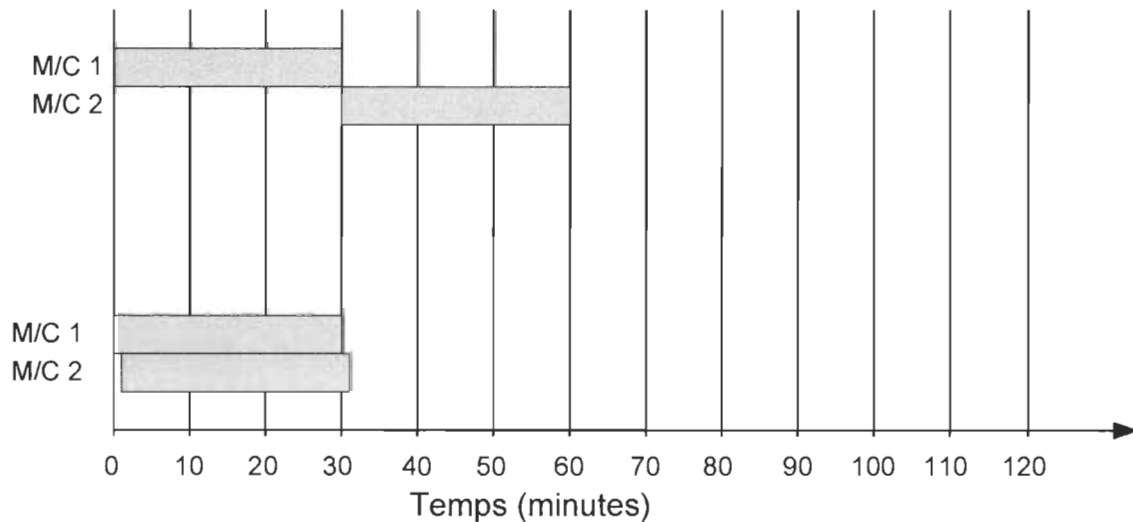


Figure 12. Potentiel d'amélioration du temps de passage avec 2 phases

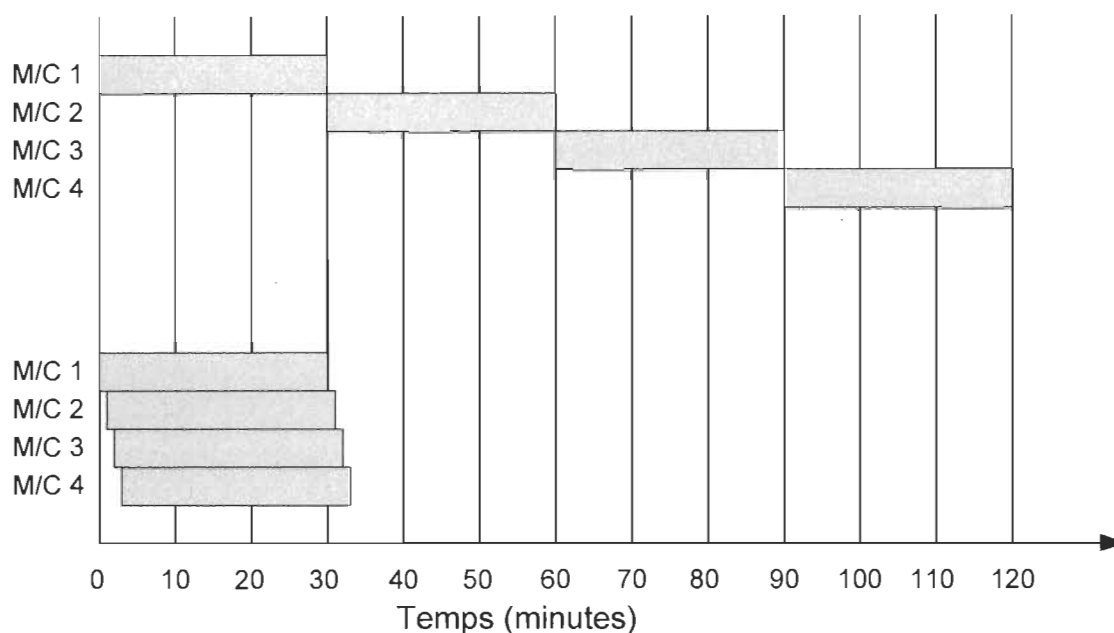


Figure 13. Potentiel d'amélioration du temps de passage avec 4 phases

Tableau 18  
Amélioration du temps de passage selon le nombre de phases (exemple)

Nombre de phases	Temps total		Amélioration potentielle
	sans chevauchement	avec chevauchement	
1	30	30	0%
2	60	31	48.3%
3	90	32	64.4%
4	120	33	72.5%
5	150	34	77.3%
6	180	35	81.0%
7	210	36	82.9%
8	240	37	84.6%
9	270	38	85.9%
10	300	39	87.0%

Note : Les calculs sont basés sur un lot de production de 30 pièces transférées unitairement entre toutes les phases et requérant 1 minute/pièce à chaque phase

### Les temps d'opération

Il s'agit du temps d'opération par pièce à chaque machine pour un produit donné. Des temps d'opération élevés contribuent à la performance du mode cellulaire car ils contribuent à augmenter les temps de traitement (*Processing time*), et donc, le potentiel de chevauchement des opérations. De plus, une faible variabilité des temps d'opération entre les phases d'un produit favorise le chevauchement optimal des opérations.

En effet, il faut équilibrer les flux entre les phases de production (en fonction du goulot). Sinon, la variabilité des temps d'opération entre les phases entraîne une désynchronisation des

opérations, ayant notamment pour effet une accumulation des encours en amont des postes plus lents. La Figure 14 illustre l'amélioration potentielle apportée par un mode cellulaire dans le cas où les temps d'opération varient.

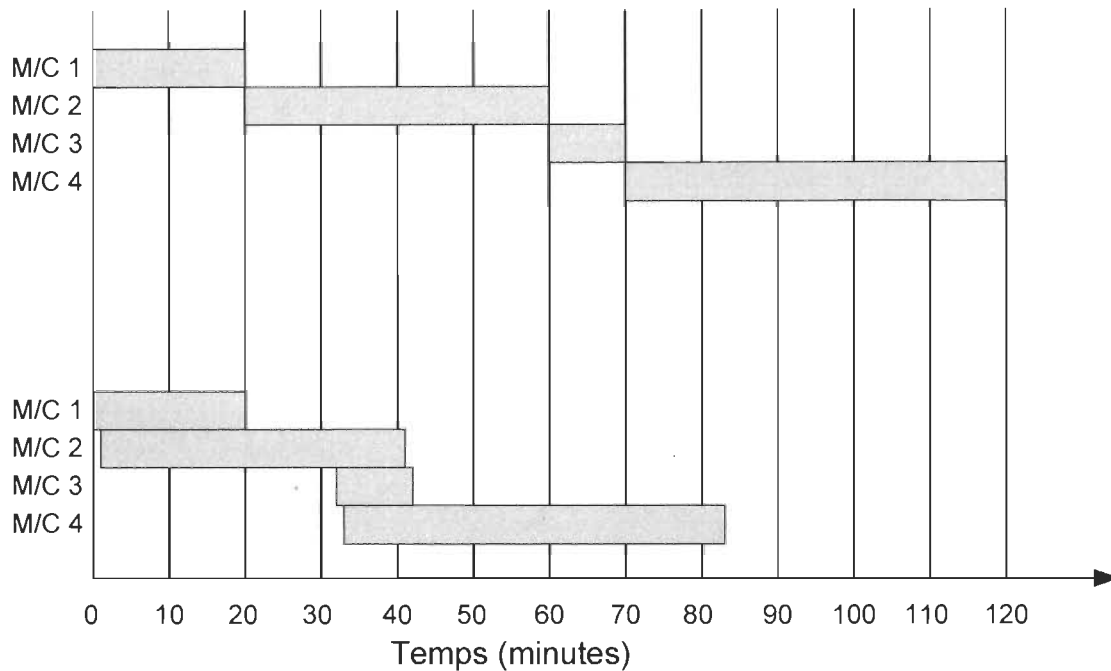


Figure 14. Potentiel d'amélioration avec 4 phases et temps d'opérations variés

Dans cet exemple, on remarque que pour un même nombre de phases et un même temps total d'opération (120 minutes), le potentiel d'amélioration du mode cellulaire passe de  $(1 - (34/120)) \times 100 = 72,5\%$  (réf. Figure 13) à  $(1 - (84/120)) \times 100 = 30\%$  (Figure 14) lorsque les temps d'opération varient d'une phase à l'autre.

#### 3.1.2.4 Lots de transfert

Les caractéristiques suivantes décrivent les lots de transfert :

- la quantité par lot de transfert (charge unitaire standard)
- le coût de manutention linéaire

##### *La quantité par lot de transfert*

Il s'agit du nombre de pièces manutentionnées entre deux machines situées dans des zones différentes. En général, cette quantité dépend de la taille des produits et des contenants qui servent à les transporter.

Lorsque les échanges sont à l'intérieur d'une même zone, on considère habituellement des lots de transfert unitaires, car les avantages majeurs du mode de production cellulaire sont étroitement liés à l'hypothèse d'un lot de transfert unitaire. On peut généraliser l'influence des divers paramètres sur l'amélioration potentielle apportée par un mode cellulaire. En effet, la diminution potentielle du temps de passage est donnée par l'équation suivante :

$$R = \sum_{n=1}^{N-1} [(Q - T_{(n \rightarrow n+1)}) * \text{MIN}\{Top_n, Top_{n+1}\}]$$

où R : la valeur de la réduction (ex : 100 minutes)

Q : la quantité à produire (ou lot de production) (ex : 500 pièces)

$T_{(n \rightarrow n+1)}$  : le lot de transfert entre la phase "n" et la suivante (ex : 10 pièces)

$Top_{(n)}$  : le temps d'opération par pièce à la phase "n" (ex : 3 min/pce)

n : le rang séquentiel d'une phase, de 1 à N (la première phase aura n = 1, et la dernière, n = N) pour un produit donné

On remarque que le potentiel d'amélioration augmente avec les facteurs suivants :

- augmentation des temps d'opération
- augmentation de la taille des lots de production
- réduction de la variabilité des temps d'opération entre les phases
- réduction de la taille des lots de transfert

Pour relativiser ce potentiel d'amélioration, il suffit de le comparer au mode départemental, dont le temps total est donné par l'équation ;

$$\text{Temps} = Q * \sum_{n=1}^N Top_n$$

### *Le coût de manutention linéaire*

On parle ici du coût de manutention par unité de distance linéaire parcourue, pour un lot de transfert (ex. : 0,25\$/100 pieds/lot de transfert). Les coûts de manutention influent directement sur le dynamisme du système. En effet, des coûts de manutention élevés comparativement aux coûts de reconfiguration des machines favorisent la justification économique des reconfigurations. Par ailleurs, cette variable est fortement liée au mode de manutention utilisé.

Notons que dans plusieurs secteurs manufacturiers observés au sein de la Chaire Bombardier, on utilise simplement des chariots sur roulettes, des transpalettes ou des chariots élévateurs conventionnels, manipulés par des journaliers ou des opérateurs assignés à cette tâche. Ces modes de manutention permettent de s'adapter à des changements de gammes (avantage appréciable en contexte turbulent), par opposition à des convoyeurs, par exemple.

Ces observations portent à croire que les coûts de manutention linéaires pour un lot de transfert varieraient peu d'un secteur manufacturier à l'autre. Par exemple, on calculera environ de 15 à 25\$/heure pour le journalier, et une vitesse de 12 000 à 15 000pi/h. On obtient un coût de manutention entre  $15/15\ 000 * 100 = 0.1\$/pi$  et  $25/12\ 000 * 100 = 0.208\$/pi$ . Ce coût n'inclut toutefois pas l'amortissement du moyen de manutention (ex : chariot), ni les économies dues à une moindre accumulation de lots de transferts, (qui immobilisent les stocks et peuvent occasionner des retards, de même qu'entraîner des coûts indirects tel que les remanipulations

plus fréquentes, l'acquisition d'une plus grande surface pour disposer des étagères d'entreposage, etc.). Par conséquent, on pourrait admettre une certaine "surévaluation" des coûts de manutention.

### 3.1.2.5 Machines

Les paramètres décrivant les machines sont les suivants ;

- le nombre d'unités de chaque type de machine
- la géométrie de chaque type de machine
- les coûts de déplacement de chaque type de machine

#### *Le nombre d'unités de chaque type de machine*

Il s'agit du nombre d'unités disponibles de chaque type de machine.

#### *La géométrie de chaque type de machine*

Cet aspect est décrit par la longueur, la largeur, et l'espace requis autour des machines, incluant un espace autour de la machine pour l'opérateur et le matériel requis.

#### *Les coûts de déplacement de chaque type de machine*

Les coûts de déplacement se composent généralement d'une partie variable, spécifique à chaque machine, et d'une partie fixe, spécifique pour une machine et une zone données.

La partie variable peut être comparée à un coût linéaire de manutention (ex. : \$/pi lin.), tandis que la partie fixe est un coût pur par déplacement (\$).

Il est intéressant de noter ici qu'une entreprise désireuse d'exploiter le concept cellulaire dynamique emploierait sans doute les moyens nécessaires pour minimiser les coûts de configuration fixes et variables, en sachant que l'aménagement est susceptible d'être modifié fréquemment. Les configurations deviendraient donc de plus en plus faciles à justifier à mesure que les améliorations seraient apportées, et le système de plus en plus flexible par rapport aux variations de l'environnement.

Par exemple, on pourra diminuer les coûts variables en installant des roulettes ou patins sous les machines, et/ou encore des adaptateurs aux modes de manutention en place (ex : adaptateur aux fourches d'un chariot élévateur). Pour les coûts fixes, les améliorations seront aussi liées aux zones (ex. : installation d'arrivées d'air comprimé, d'eau, d'électricité, plancher de béton, etc.) et à des systèmes de fixation et branchement rapides des machines (principe du SMED).

Cet élément est d'autant plus important que les améliorations abaisseront souvent les coûts de reconfiguration pour des catégories de machines (plutôt que des machines uniques), pour peu que ces machines soient relativement semblables entre elles.

### 3.1.2.6 Site de production

Le site de production est une notion complexe. Dans cette étude, il a été modélisé par les éléments suivants;

- le nombre de zones
- la géométrie de chaque zone
- les distances interzones

#### *Le nombre de zones*

Une zone est décrite comme une délimitation physique (parfois logique) du site de production. Le nombre de zones est une variable qui influence considérablement la taille du modèle de configuration, et par conséquent du temps de résolution du modèle, essentiellement en raison de la taille de la matrice des distances interzones que cela entraîne (nous y reviendrons à la p.52).

Les zones sont généralement définies en fonction de contraintes physiques. Lorsque ce n'est pas le cas, ce sont des "contraintes artificielles", nécessaires pour les seules fins de résolution du modèle.

#### *La géométrie de chaque zone*

Les zones sont décrites par leurs coordonnées et leur surface. Comme le modèle de configuration ne considère que les surfaces, on fait à chaque configuration une vérification quant à la faisabilité de la solution, en fonction des géométries de chaque zone et des machines qui y sont configurées. Les solutions irréalisables à cause de la géométrie sont la plupart du temps évitées, en spécifiant un objectif conservateur du taux d'occupation de la surface totale avant la génération du site de production. En pratique, la taille de la zone doit idéalement permettre d'exécuter toute la gamme des opérations pour un produit à l'intérieur d'une même zone, en d'autres mots, d'avoir toutes les machines d'une cellule dans une même zone, car sinon, il y aura des échanges interzones.

La Figure 15 illustre l'exemple d'une solution irréalisable à cause de la géométrie des zones et des machines. En effet, la machine #1 occupe  $6 \times 6 = 36\pi^2$ , tandis que la machine #2 occupent  $5 \times 5 = 25\pi^2$ , pour un total de  $61\pi^2$ . La zone qui doit les accueillir a une capacité de  $10 \times 10 = 100\pi^2$ . Cette solution est donc théoriquement réalisable ( $100\pi^2 > 61\pi^2$ ), mais à cause de la géométrie des machines et de la zone, une portion de l'espace disponible est inutilisable, et la solution s'avère irréalisable. C'est aussi le cas lorsque, par exemple, on tente de placer une machine de  $3\pi \times 12\pi$  ( $36\pi^2$ ) dans une zone carré de  $10\pi$  de côté ( $100\pi^2$ ).

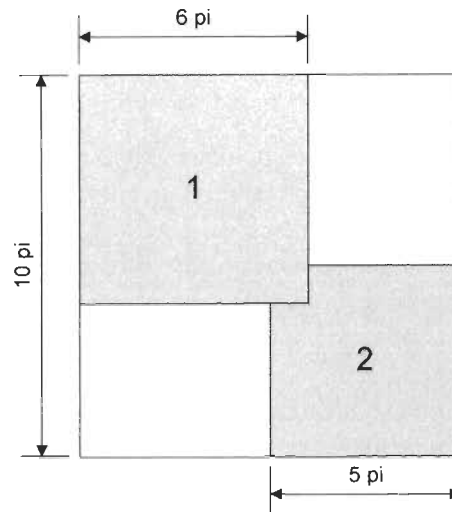


Figure 15. Illustration d'une solution irréalisable à cause de la géométrie

### *Les distances interzones*

Cette variable représente la distance rectilinéaire d'une zone à une autre, centroïde à centroïde. La matrice présentant toutes les distances d'une zone à l'autre se nomme *matrice "De-À" des distances*. Il est intéressant ici de noter que dans le cas d'une *matrice symétrique*<sup>11</sup>, le problème de configuration des cellules pourrait être modélisé en fonction d'une *matrice "Entre" des distances*, ce qui favoriserait la simplification du problème, au niveau de la série de contraintes #4 visant la conversion du problème d'assignation quadratique en problème d'optimisation linéaire (Rheault, Drolet, et Abdulnour, 1996b). La diminution potentielle du nombre de contraintes de cette série tend vers 50% pour un nombre de zones infini, mais atteint déjà les 40% avec seulement 5 zones, tel que l'illustre la Figure 16.

En réalité, il s'agit d'une simple nuance dans les combinaisons possibles des zones. Lorsque la matrice est orientée (matrice de-de-à), la combinaison de deux zones n'est valable que dans un sens car elle ne donne pas la même distance en sens inverse. Par exemple, on n'aura pas nécessairement la même distance de la zone #1 à la zone #2 que de la zone #2 à la zone #1 lorsque le chemin emprunté est différent pour le retour. Le nombre de distances interzones est alors donné par l'équation suivante.

$$N = Z^2$$

Où :    N : le nombre de distances interzones  
           Z : le nombre de zones

<sup>11</sup> Une matrice symétrique se définit comme une matrice où tous les éléments de la ligne  $n$  vers la colonne  $m$  sont égaux aux éléments de la ligne  $m$  vers la colonne  $n$ . Dans notre cas particulier, cela signifie que la distance entre toutes les zones prises 2 à 2 est la même à l'aller et au retour.

Lorsque la matrice n'est pas orientée (matrice entre), la combinaison de deux zones est valable dans les deux sens car elle donne la même distance. Par exemple, on aura la même distance de la zone #1 à la zone #2 que de la zone #2 à la zone #1. Le nombre de distances interzones est alors donné par l'équation suivante ;

$$N = \frac{(Z + 1)!}{2(Z - 1)!}$$

Où : N : le nombre de distances interzones

Z : le nombre de zones

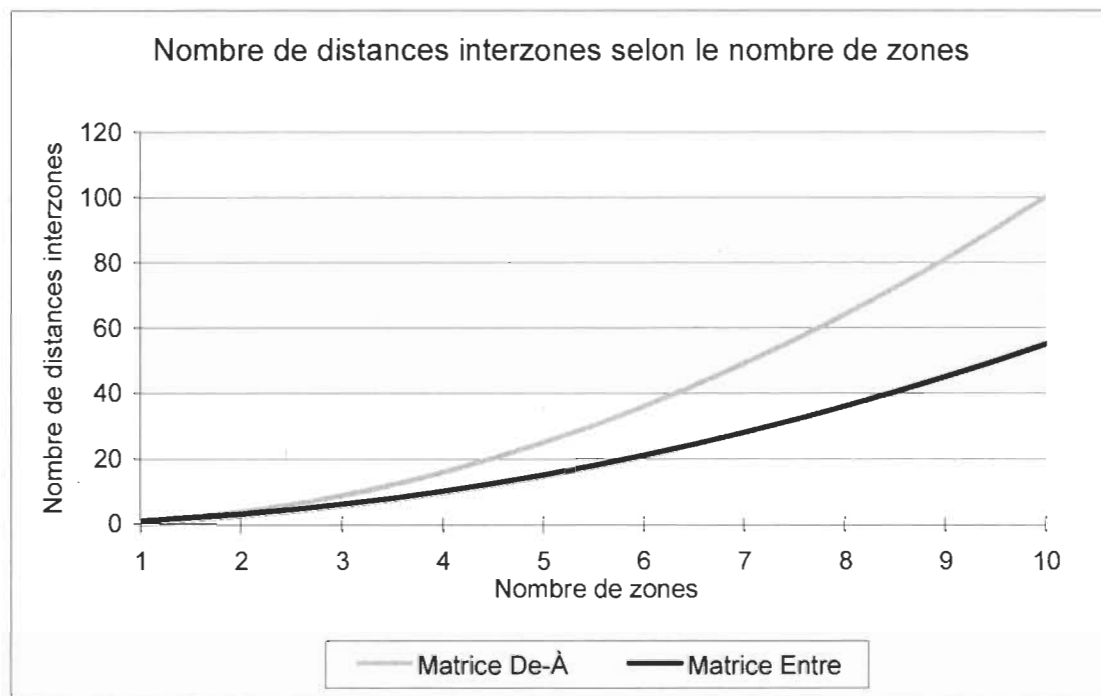


Figure 16. Nombre de distances interzones selon le nombre de zones

Il s'agit là d'une amélioration notable puisque le nombre de distances interzones comporte une interaction directe avec le nombre de phases et le nombre de produits considérés dans l'horizon de configuration.

En effet, pour chaque échange non-nul de la fonction objective du modèle, la série de contraintes #4 génère autant de contraintes qu'il y a de distances interzones. Ainsi, le pire scénario à résoudre pour un horizon de configuration donné serait un mix-produit très disparate, composé de gammes diversifiées, où chacune de ces gammes comporterait beaucoup de phases, et le tout combiné avec une matrice volumineuse de type "de-à" des distances interzones.



### 3.1.2.7 Expérimentation

Par variables d'expérimentation, on désigne les variables suivantes :

- le système à étudier
- le nombre de configurations
- l'horizon de réévaluation

#### *Le système à étudier*

On parle ici du mode de production à l'étude (voir section 2.1).

#### *Le nombre de réévaluations*

Le nombre de réévaluations désigne le nombre de fois que le système sera réévalué, ce qui dans le cas d'un SMCD inclut aussi l'aménagement. Pour les autres modes de production, l'aménagement est déterminé au départ et demeure le même tout au long du cas ; on réévalue seulement la planification de production selon les changements au carnet de commande et les commandes en cours.

#### *L'horizon de réévaluation*

Cette variable désigne le temps entre deux réévaluations (de l'aménagement et de la planification). Il est mesuré en temps de travail et non en temps chronologique. Il pourrait être pertinent de distinguer entre l'horizon de réévaluation de l'aménagement et l'horizon de réévaluation de la planification, ce qui n'est cependant pas le cas du modèle actuel.

En examinant la Figure 10 (p.43), on remarque que :

- l'horizon de configuration ( $H_c$ ) est de 5000 minutes
- l'horizon de planification ( $H_p$ ) est de 3000 minutes, donc  $H_p = 3H_c/5$
- l'horizon de réévaluation ( $H_r$ ) est de 2000 minutes, donc  $H_r = 2H_c/5 = 2H_p/3$
- il y a 6 évaluations
- l'horizon total considéré pour ce cas s'élève à 15000 minutes. L'horizon total est donnée par l'équation suivante :

$$\text{Horizon total du cas} = H_r \cdot (\text{Nb. évaluations} - 1) + H_c$$

- il y a un chevauchement de 3000 minutes entre deux réévaluations subséquentes de la configuration, et il y a un chevauchement de 1000 minutes entre une réévaluation de la configuration et la suivante. Un chevauchement élevé signifie normalement que la matrice des échanges ne varie pas beaucoup d'une évaluation à l'autre, et par conséquent que l'aménagement reste plus stable.
- il y a un chevauchement de 1000 minutes entre deux réévaluations subséquentes de la planification. Des réévaluations fréquentes (chevauchement élevé), voire en temps réel, favorisent un meilleur contrôle de la production.

L'horizon de planification de la deuxième évaluation se termine avec l'horizon de configuration de l'évaluation initiale (cette observation vaut d'une évaluation à l'autre pour l'ensemble du cas). Il s'agit d'une coïncidence de l'exemple illustré.

Comme on l'a mentionné, la solution proposée par le modèle répond à une moyenne des besoins d'aménagement sur l'ensemble de l'horizon de configuration considéré. Ainsi, plus cet horizon est long, plus la solution d'aménagement répond à une moyenne des besoins plutôt qu'à des besoins d'aménagement ponctuels, précis. Si l'horizon de configuration est très court au contraire, le volume des échanges ne justifiera que peu ou même aucune reconfiguration. Dans les deux cas, l'entreprise pourrait manquer des occasions très profitables (Marcoux, Drolet, et Abdulnour, 1997).

Plus l'horizon de planification est long, plus la proportion planifiée des commandes introduites lors de l'aménagement peut être grande. Si cet horizon est très long, le programme fixe sera trop long et engorgera le système, l'empêchant de réagir aux changements de la demande. À l'opposé, un horizon trop court ne générera pas de programme fixe d'une durée raisonnable, et entraînera une constante replanification qui repousserait des ordres entamés mais non prioritaires, et donc des temps de passage inacceptables pour certaines commandes.

Pour la réévaluation, un horizon trop court entraînera des réévaluations fréquentes, peut-être inutiles, tandis qu'un horizon trop long se traduira par un manque de suivi et un délai de réaction aux changements trop élevé.

Mentionnons ici qu'il est tout à fait possible de perfectionner le contrôle du système, et notamment selon une ou l'autre des façons suivantes :

- en distinguant entre la réévaluation de la configuration et la réévaluation de la planification
- en introduisant la notion de "variable de vigilance" ; par exemple, les réévaluations pourraient être occasionnées par la première des deux éventualités suivantes : un événement, ou un moment prédéterminé (c'est la notion de OU inclusif fréquemment utilisée en maintenance conditionnelle)
- en introduisant la notion de "seuil de vigilance" ; par exemple, les événements signalés par les variables de vigilance ne déclencheraient pas systématiquement la réévaluation, mais plutôt en fonction d'un certain niveau de gravité limite (seuil). Par exemple, on pourrait anticiper le coût de manutention supplémentaire occasionné par l'introduction d'une commande urgente non connue à la dernière évaluation : si ce coût dépassait un certain seuil par rapport aux coûts marginaux de manutention planifiés pour l'horizon de configuration en cours, on réévaluerait immédiatement le système ; en deçà de ce seuil, la commande serait planifiée sans toutefois modifier la configuration. Les seuils de vigilance pourraient même être utilisés en conjonction ; on parlerait alors de seuil de vigilance multiple

- en introduisant la notion de "variable de contrôle multiple" : les commandes cesseraient d'être introduites suivant les seuils de plusieurs variables reliées par des règles de décision. Par exemple, on pourrait cesser d'introduire les commandes dans la matrice des échanges suivant la première éventualité entre un nombre de flux "X" dans la matrice des échanges, et une charge machine "Y" (OU inclusif)
- en développant des modèles qui identifieraient les variables de vigilance et de contrôle à utiliser pour la prochaine configuration, planification et réévaluation, et paramétrerait les seuils et la pondération de ces variables. Par exemple, l'horizon de réévaluation pourrait être périodiquement réajusté en fonction de la turbulence. Ce concept s'approche de la notion de variables autoadaptatives utilisée en méthodes prévisionnelles, ou encore du concept des réseaux neuronaux (neural networks)
- en développant des heuristiques permettant de minimiser les mises en courses et de séquencer de façon optimale les réaménagements, par exemple à l'aide des technologies de groupes

Ces améliorations pourraient prendre la forme d'un système expert complexe qui représente un volume de recherche énorme en soi, sans compter l'effet d'interaction possible entre les variables des différents niveaux (configuration - planification - réévaluation). Malgré tout, la Figure 17 schématise ce que pourrait être un tel système. Les variables A, B, et C sont des variables de vigilance car elles servent à mesurer les écarts par rapport à la dernière planification établie, tandis que les variables D, E, et F sont des variables de contrôle car elles agissent sur la planification elle-même.

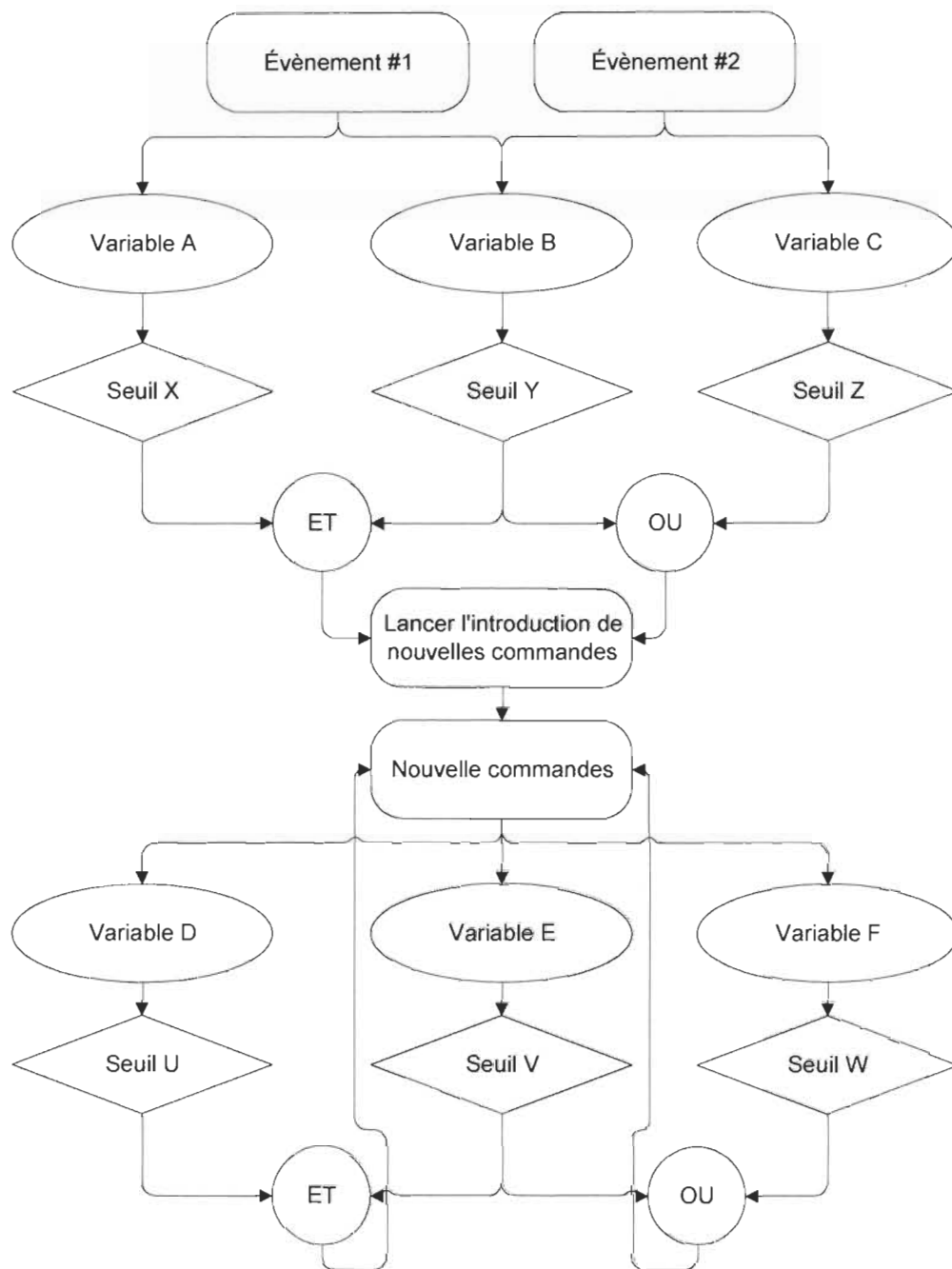


Figure 17. Schéma partiel d'un éventuel système expert pour SMCD

## 3.2 Simulation informatique

### 3.2.1 L'approche par simulation

La modélisation de systèmes physiques est souvent établie à partir de modèles visuels, graphiques ou mathématiques (ex : mécanique, thermodynamique, résistance des matériaux,

etc.). Cependant, la modélisation de systèmes complexes est souvent plus difficile que la modélisation de systèmes physiques pour les raisons suivantes (Pritsker, 1986) :

- peu de règles fondamentales sont disponibles
- de nombreux éléments de procédures impliqués sont difficiles à décrire et à représenter
- certaines politiques d'intrants requises sont difficiles à quantifier
- les éléments aléatoires sont significatifs
- les mécanismes de décision font partie intégrante du système

L'approche par simulation permet d'aplanir ces difficultés. Par surcroît, la simulation informatique permet d'expérimenter et d'inférer sur le système à l'étude sans le construire, le déranger, ni le détruire (Pritsker, 1986).

Les étapes du développement d'un modèle de simulation sont listées au Tableau 19 (Pritsker, 1986 ; Shannon, 1975).

Tableau 19  
Étapes de développement d'un modèle de simulation informatisé

Étape	Description
Formulation du problème	La définition du problème à étudier incluant la formulation des objectifs à atteindre, sous forme itérative.
Construction du modèle	L'abstraction du système en relations logiques et/ou mathématiques, congruentes avec la formulation du problème (niveau de détail).
Collecte de données intrantes	L'identification, la précision, et la collecte de données intrantes.
Translation du modèle	La préparation du modèle pour le traitement informatique
Vérification	Le processus consistant à vérifier que le programme s'exécute bien tel que prévu.
Validation	Le processus consistant à vérifier qu'il existe bel et bien une correspondance entre le modèle de simulation et le système réel.
Planification stratégique et tactique	Le processus consistant à établir les conditions d'expérimentation du modèle de simulation.
Expérimentation	Exécution du modèle de simulation afin d'obtenir les résultats/performances.
Analyse des résultats	L'analyse des résultats de la simulation afin d'inférer sur le modèle et établir les recommandations pertinentes à l'atteinte des objectifs.
Implantation et documentation	Implantation des décisions résultant de la simulation et documentation du modèle et de son utilisation.

Source : Pritsker, 1986 : Introduction to simulation and SLAM II, 3e édition, John Wiley & Sons, 839 pages,

### 3.2.2 Choix du langage

Le langage retenu pour la simulation est Microsoft Visual FoxPro, version 5.0. Les avantages techniques du logiciel sont : bases de données relationnelles, langage orienté-objet (voir annexe C, p.123) débogueur et traceur puissants, convivialité, transfert de données aisé avec les autres

applications de Windows (notamment Access et Excel). De plus, ce logiciel est abordable, répandu, connu par un grand nombre de programmeurs et autres, et facilement disponible en version commerciale, en français et en anglais. Ainsi, l'utilisation d'un logiciel spécifiquement conçu pour la simulation (ex : SLAM II) n'a pas été retenue pour cette étude.

De plus, le modèle développé sur VFP a des avantages dignes de mention. En effet, celui-ci couvre l'ensemble de l'expérimentation : la génération, l'itération, la mise en mémoire des cas détaillés, et la mesure des performances s'effectuent sans intervention de l'utilisateur une fois que les paramètres initiaux sont entrés. VFP a aussi permis le développement d'une interface usager conviviale qui permet de générer, puis suivre l'évolution de l'expérience ; et surtout, cette interface peut être améliorée relativement aisément dans les développements futurs. Enfin, le programme développé sur VFP dispose de modules s'apparentant aux modules de planification d'un MRP2. Il serait donc probablement plus aisé de l'intégrer à un tel logiciel de gestion manufacturière commercialisé.

### **3.2.3 Description du programme**

La figure suivante illustre le fonctionnement du programme principal développé sur VFP (des schémas détaillés de chaque étape sont présentés à l'annexe D).

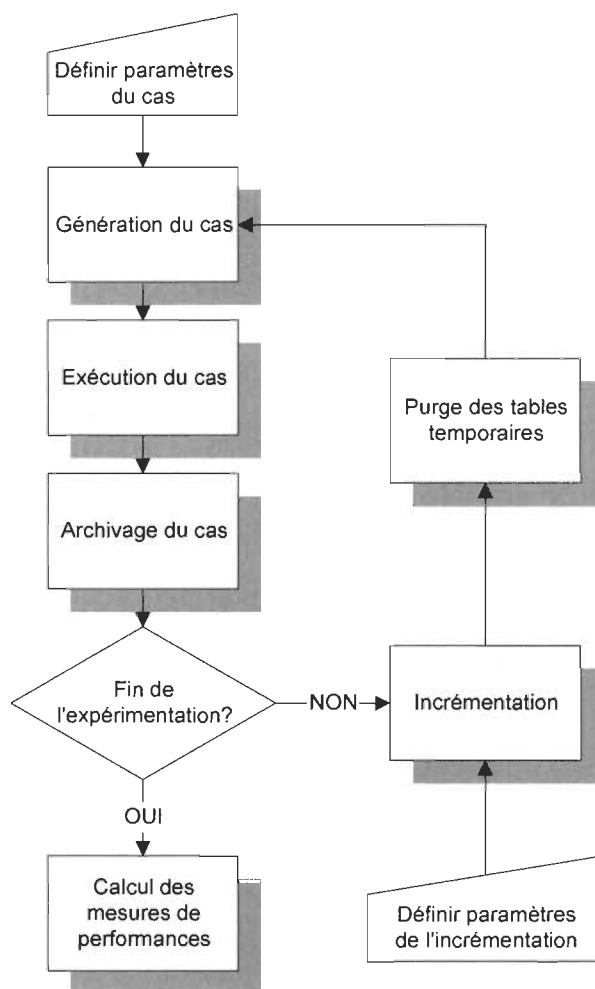


Figure 18. Schéma de fonctionnement simplifié du programme principal

### 3.2.3.1 Génération d'un cas prévu au plan d'expérience

Il y a deux groupes d'intrants ; d'abord, les données sur le (premier) cas sont exigées, et en deuxième lieu, les données d'incrément des cas. Il est aussi possible d'incrémenter les cas avec une intervention de l'utilisateur avant chaque cas.

L'annexe E illustre les pages du formulaire utilisé pour la génération du cas, et comment ces variables interviennent dans la génération du cas. Les données générées aléatoirement<sup>12</sup> sont réparties dans les tables suivantes :

- machines
- zones (site de production)
- distances interzones

<sup>12</sup> Toutes les données générées aléatoirement suivent une distribution de probabilité uniforme à l'exception des portions de croissance et décroissance des cycles de vie des produits.

- coûts de configuration
- plages de disponibilité
- produits
- gammes (routages) et temps d'opération
- carnet de commandes

### 3.2.3.2 Exécution d'un cas prévu au plan d'expérience

La figure suivante illustre le fonctionnement du module d'exécution du cas.

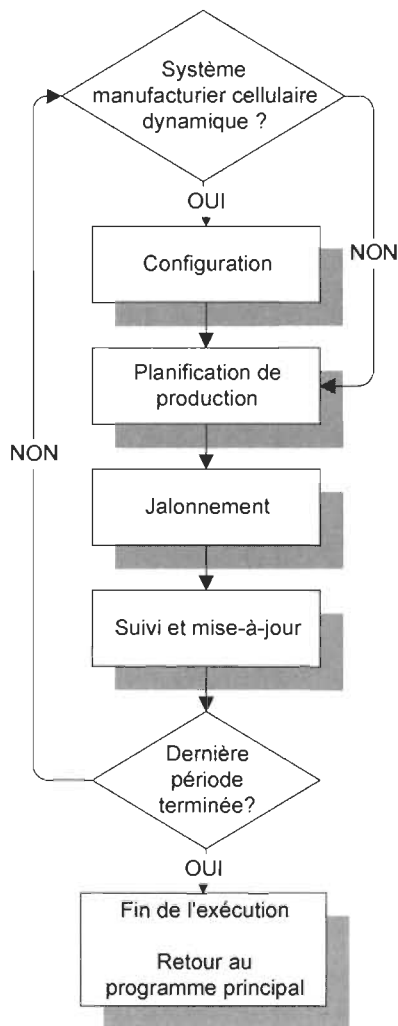


Figure 19. Vue d'ensemble du module d'exécution

Comme on peut le remarquer, il y a quatre grandes étapes dans l'exécution, dont voici une brève description.



### *Configuration*

À partir des nouvelles commandes introduites à partir du carnet de commandes, des lots en attente de lancement, et des lots en cours de production, ce module détermine la solution d'aménagement. C'est le cœur du SMCD ; pour le SMCC, l'optimisation n'est faite qu'à la première évaluation, où les coûts de configuration sont considérés comme nuls, et pour les AS, cette étape n'est pas applicable.

### *Planification*

Ce module priorise les commandes et les fractionne en lots de production selon les politiques établies, en vue du jalonnement.

### *Jalonnement*

Ce module détermine le calendrier de production (diagramme de Gantt) en déterminant les dates de début et de fin de chaque lot sur chaque machine, en considérant les contraintes de préséances, le type de calendrier, le sens du jalonnement et les règles de bris d'égalité.

### *Suivi et mise-à-jour*

Ce module enregistre la configuration actuelle et la production complétée, puis met à jour le calendrier de production, les coûts de configuration, les plages de disponibilité et la disponibilité globale pour la prochaine évaluation.

### **3.2.3.3 Archivage d'un cas prévu au plan d'expérience**

Ce module enregistre les données générées au début du cas (site de production, parc-machines, produits, gammes, etc.) de même que le déroulement complet du cas (configurations, production).

### **3.2.3.4 Incrémentation**

Ce module détermine le prochain niveau de chaque variable d'expérimentation en fonction des paramètres d'incrémentation établis au départ, et génère un cas considérant les nouveaux paramètres.

Bien qu'il serait possible dans certains cas de ne générer qu'une partie des données et simplement réinitialiser les autres (par exemple lorsque seules les règles de priorité sont modifiées), le cas est systématiquement généré au complet pour être statistiquement aléatoire.

### **3.2.3.5 Calcul des mesures de performance**

Les mesures de performance sont calculées et enregistrées une fois le cas terminé. Cette partie a été traitée à la section précédente (voir p.25).

### 3.3 Design expérimental

La modélisation informatique du système comporte une cinquantaine de facteurs qu'il est possible de paramétrer, ce qui représenterait environ  $1.1259 \times 10^{15}$  cellules d'expérimentation pour un design expérimental complet (en supposant un minimum de 2 niveaux par facteur) sans compter au moins 2 essais par cellule, afin de laisser suffisamment de degrés de liberté pour la variation résiduelle.

Il s'agit d'un problème de taille lorsqu'on considère que chaque problème d'optimisation (réévaluation) requiert jusqu'à 180 minutes pour la résolution. Par conséquent, plusieurs facteurs ont été fixés, et notre choix s'est orienté vers les méthodes Taguchi, souvent privilégiées dans ce genre de situation.

Les étapes généralement reconnues pour établir le degré et le mode d'influence des divers paramètres sur les variables réponses sont résumées au tableau suivant (Baillargeon, 1993 ; Ross, 1988 ; Roy, 1990) ;

Tableau 20  
Étapes des méthodes Taguchi

Description de l'étape	Objectif	Exemples d'outils utilisés
Choix des facteurs contrôlables et identification des facteurs bruits Identification des interactions à prendre compte prioritairement	Préciser l'objectif de l'étude et identifier les variables réponses	Brainstorming Diagramme d'Ishikawa
Choix des niveaux des facteurs d'expérimentation		
Choix approprié d'une table orthogonale pour planifier les essais	Concevoir des essais statistiquement analysables	Codification des tables orthogonales Taguchi Graphes linéaires Tables triangulaires des interactions
Réalisation des essais	Obtention des mesures de variables réponses	Simulation, prototype, etc.
Exploitation des résultats	Déterminer les facteurs et interactions significatifs Visualiser le comportement des facteurs niveau par niveau et ainsi, préciser les résultats de l'analyse de variance	Analyse de variance (ANOVA) de la réponse Analyse graphique des résultats Analyse du ratio signal/bruit
Validation : essai de confirmation	Validation des résultats obtenus à l'optimalité	

### 3.3.1.1 Degrés de liberté requis

Le nombre de degrés de liberté associé à une somme de carrés d'un facteur correspond au nombre de niveaux d'expérimentation de ce facteur moins 1, tandis que pour un effet d'interaction entre deux facteurs, le nombre de degrés de liberté correspond au produit des degrés de liberté des facteurs constituant l'interaction. On peut modifier le plan, par exemple en sacrifiant 3 colonnes à 2 niveaux (3 dl) pour constituer un facteur à 4 niveaux.

Le nombre de degrés de liberté de la table choisie (nombre d'essais x nombre de répétitions -1) doit être supérieur à la somme de tous les degrés de liberté requis pour les facteurs et interactions, sans quoi il ne reste aucun degré de liberté pour la variation résiduelle, et la signification n'est alors pas vérifiable statistiquement. Il faut donc répéter les essais un certain nombre de fois.

### 3.3.2 Choix des effets à analyser

Les facteurs qui ont été retenus pour cette étude sont :

- l'ordre d'introduction des commandes, i.e. la règle de priorité<sup>13</sup> (facteur A)
- le système à l'étude (facteur B)
- le type de calendrier (facteur C)
- l'horizon considéré pour le chargement ("*loading*"), au niveau de la configuration<sup>14</sup>, en semaines (facteur D)
- la taille des lots de transfert interzones, en nombre de pièces/lot de transfert (facteur E)
- le nombre de produits du carnet de commande (facteur F)
- le coût de manutention linéaire des charges unitaires et des machines, en \$/100pi (facteur G)

La moyenne et l'étendue, pour :

- la taille moyenne des commandes par produit (en nombre de pièces/commande/produit) (facteurs H1 et H2),
- la durée totale des cycles de vie par produit, en semaines (facteurs I1 et I2)
- le délai (de préavis) entre la date due et la date de prise de commande, en semaines (facteur J1 et J2)

---

<sup>13</sup> On fixe l'ordre d'introduction des commandes comme étant le même pour tous les niveaux de planification.

<sup>14</sup> On fixe l'horizon considéré pour le chargement au niveau de la planification à 50% de celui de la configuration.

### 3.3.2.1 Choix des niveaux

Le tableau suivant résume la classification des facteurs et leurs niveaux d'expérimentation respectifs.

Tableau 21  
Classification et niveaux d'expérimentation des facteurs retenus

Code	Contrôle (C) Bruit (B)	Niveaux					Degrés de liberté (dl)
		Nbre	1	2	3	4	
A	C	4	PAPS	DDUE	SPT	RC	3
B	C	3	SMCD	SMCC	AS	SMCD'	2
C	C	2	Active	Non-delay			1
D	C	2	4	8			1
E	C	2	20	50			1
F	B	4	50	60	70	80	3
G	B	2	0.20	0.50			1
H1	B	2	50	100			1
H2	B	2	±10% de H1	±50% de H1			1
I1	B	2	8	12			1
I2	B	2	±25% de I1	±50% de I1			
J1	B	2	4	12			1
J2	B	2	±25% de J1	±50% de J1			1

Note : La colonne "Contrôle" ou "Bruit" sert dans le cas où l'expérimentation serait approfondie dans cette voie.

La règle PAPS est appliquée tel que Premier Arrivé dans le Système, Premier Servi (*First Come in System, First Served : FCSFS*).

La règle SPT est appliquée tel que la tâche prioritaire à une phase donnée est celle dont le temps d'exécution de ladite tâche à ladite phase est le plus court.

Même en ne gardant que ces facteurs, (10 facteurs à 2 niveaux, 1 facteur à 3 niveaux, et 2 facteurs à 4 niveaux), un design expérimental complet requerrait  $2^{10} \times 3^1 \times 4^2 = 49\ 152$  cellules d'expérimentation.

### 3.3.2.2 Choix des interactions

Les 13 facteurs retenus pour l'expérimentation génèrent un potentiel de  $(n-1)*n/2 = 78$  interactions pris 2 à 2. Le tableau suivant illustre les interactions possibles.

Tableau 22  
Interactions potentielles

	A	B	C	D	E	F	G	H1	H2	I1	I2	J1	J2
A		AB	AC	AD	AE	AF	AG	AH1	AH2	AI1	AI2	AJ1	AJ2
B			BC	BD	BE	BF	BG	BH1	BH2	BI1	BI2	BJ1	BJ2
C				CD	CE	CF	CG	CH1	CH2	CI1	CI2	CJ1	CJ2
D					DE	DF	DG	DH1	DH2	DI1	DI2	DJ1	DJ2
E						EF	EG	EH1	EH2	EI1	EI2	EJ1	EJ2
F							FG	FH1	FH2	FI1	FI2	FJ1	FJ2
G								GH1	GH2	GI1	GI2	GJ1	GJ2
H1									H1H2	H1I1	H1I2	H1J1	H1J2
H2										H2I1	H2I2	H2J1	H2J2
I1											I1I2	I1J1	I1J2
I2												I2J1	I2J2
J1													J1J2
J2													

Compte tenu du grand nombre d'interactions et du risque de ne pas retenir les plus significatives pour l'expérimentation (risque inhérent aux plans Taguchi), la méthodologie retenue (plus itérative) est la suivante ;

A) On élimine toutes les interactions de l'expérimentation initiale.

B) Si l'expérimentation initiale révèle un faible degré de signification ;

1. On réattribue tous les degrés de liberté et sommes de carrés des facteurs non-significatifs à la variation résiduelle (*pooling*).
2. On évalue grossièrement l'influence de chaque interaction en calculant un "indice de sévérité" (SI (%)), donné par :

$$SI (\%) = 50 (1 - m_1/m_2) \quad \text{où :}$$

$$m_1 : A_2B_1 - A_1B_1$$

$$m_2 : A_2B_2 - A_1B_2$$

$$|m_1| < |m_2|$$

$A_iB_j$  : la moyenne des valeurs observées avec le facteur A au niveau "i" et le facteur B fixé au niveau "j".

En fait, cette étape est une variante plus "objective" de l'analyse graphique : on mesure la différence entre deux niveaux de A, en gardant B fixe, et on compare les différences interniveaux de A pour les 2 niveaux de B. Les droites se croisent si les valeurs sont très différentes (ex : 90 degrés, i.e. SI = 100%), et alors on peut soupçonner une forte interaction entre A et B. (Roy, 1990) ;

3. On calcule le degré de signification des interactions par ordre décroissant d'indice de sévérité, jusqu'à obtenir un seuil de confiance acceptable, ou le nombre limite de degrés de liberté. Cette analyse peut très bien s'effectuer en dehors du plan expérimental, i.e. sans assigner de colonnes aux interactions, grâce à la simple analyse ANOVA. Toutefois, il ne peut pas y avoir plus de degré de liberté que le nombre accordé par le plan d'expérimentation retenu au départ (ex : un plan  $L_{32}(2^{31})$  ne peut accorder qu'un total de 31 dl aux facteurs, interactions, et variance résiduelle), s'il n'y a pas de réplifications.
4. Si l'expérience se révèle toujours peu significative, il y a lieu de se poser des questions sur le modèle actuel !

### 3.3.2.3 Facteurs fixés pour l'expérimentation

Comme il a été mentionné précédemment, plusieurs facteurs ont été modélisés, mais seront fixés dans le cadre de cette étude<sup>15</sup>. Ces facteurs sont ;

- La capacité brute par période (50 heures/semaine, soit 3000 minutes)
- Le tampon de capacité (10%)
- Le nombre de machines (18) et le nombre de goulots admissibles lors du chargement (nombre de goulots admissibles = nombre de machines)
- L'horizon considéré pour le chargement au niveau de la planification (fixé à 50% de l'horizon de configuration).
- L'ordre d'introduction des commandes pour la planification (le même que pour la configuration)
- La politique de lots de transfert interzones<sup>16</sup> basée sur la quantité, et la taille des lots de transfert intrazones (unitaires)
- Jalonnement en mode aval
  - La distribution de probabilité uniforme<sup>17</sup>, pour ;
    - la taille moyenne des commandes par produit (facteurs H1 et H2)
    - Le délai de préavis des commandes (J1 et J2)

---

<sup>15</sup> Afin de réduire le nombre de variables d'expérimentation, certains paramètres ont été fixés en fonction des variables d'expérimentation, ce qui a toutefois le désavantage de "fragiliser" le design expérimental.

<sup>16</sup> Dans le modèle informatique, la politique de la taille des lots de transfert interzones peut être établie en fonction de la durée cumulative d'opération, du nombre de pièces, ou du volume occupé. Pour chacune de ces politiques, on peut paramétrer la valeur (ex : 20 pièces pour une politique basée sur la quantité).

<sup>17</sup> Pour ces facteurs, la moyenne et l'étendue de la distribution sont des facteurs d'expérimentation.

- La distribution de probabilité uniforme et les bornes, pour ;
  - La taille minimale des commandes (de 5% à 10% de la taille moyenne des commandes, qui elle, varie selon le produit)
  - La durée du plateau du cycle de vie (de 25% à 50% de la durée totale du cycle de vie, qui elle, varie selon le produit)<sup>18</sup>
  - La date de début des cycles de vie (entre 0% et 90% de la durée de l'expérimentation)
  - Le nombre de phases pour un produit (de 3 à 7 phases/produit)
  - Les temps d'opération (de 2 à 6 minutes/phase/pièce)
  - Le volume cubique des pièces (de 27 po<sup>3</sup> à 216 po<sup>3</sup>)

Le tableau suivant résume les facteurs fixés pour chaque type de machine, soit la répartition du parc-machine entre les différents types de machines, la géométrie et la surface requise pour chaque type de machine, incluant l'espace autour des machines ( $\frac{1}{4}$  pi sur chaque côté), et les coûts de configuration fixes et linéaires pour chaque type de machine.

Tableau 23  
Facteurs fixés pour les différents types de machines

Facteur	Type A	Type B	Type C
Proportion du parc-machine	$\frac{1}{2}$	$\frac{1}{3}$	$\frac{1}{6}$
Largeur x Longueur = Surface (pi x pi = pi <sup>2</sup> )	4 x 4 = 16	4 x 8 = 32	8 x 8 = 64
Coûts de déplacement (\$/100 pi)	0.10	0.5	1.00
Coûts de déplacement fixe (\$)	0	25	250

On fixe aussi la morphologie du site de production, qui comprend la largeur de l'allée centrale (8 pieds), le nombre de zones au total (5) et dans la partie "Nord" (3), et le taux d'inoccupation moyen espéré (20%).

Pour l'ordonnancement, les commandes ne sont ni regroupées, ni fractionnées.

Enfin, la durée de l'expérimentation est fixée à 50 semaines, et la période de réévaluation, à 1 semaine. On exige une amélioration minimale de 20% pour explorer une autre branche que celle ayant généré la meilleure solution à une itération donnée.

---

<sup>18</sup> Les portions croissante et décroissante du cycle de vie des commandes pour un produit donné suivent une courbe de distribution de type Bêta, avec  $\alpha = 4$  et  $\beta=3$ , afin de donner un profil similaire à la courbe du cycle de vie des biens : mise en marché, croissance, maturité, et déclin. La taille moyenne des commandes pour un produit correspond à la moyenne de toutes les commandes pour ce produit.

### 3.3.3 Synthèse du plan expérimental retenu

Le plan expérimental retenu est illustré à la figure suivante. Il s'agit d'un plan  $L_{32}(2^{31})$ , modifié pour accommoder les deux facteurs à 4 niveaux et le facteur à trois niveaux. Pour les facteurs à 4 niveaux, la combinaison de 2 colonnes forme une variable à 4 niveaux, et on doit sacrifier la colonne d'interaction (identifiée à partir des tables triangulaires pour interactions de plans Taguchi). Pour le facteur à trois niveaux, on procède comme pour un facteur à 4 niveaux, sauf qu'on répète le 1<sup>er</sup> niveau à la place du 4<sup>e</sup> niveau.

Tableau 24  
Plan expérimental retenu

Colonne	1&2	8&17	16&27	9	10	15	14	5	6	4	7	13	12
Facteur	Nb.Prod	Règle	Système	Calendrier	Hcfig	Qt	Cmanu	Xqmo	Eqmo	Xcycle	Ecyc	Xpréavis	Epréavis
Essai	F	A	B	C	D	E	G	H1	H2	I1	I2	J1	J2
1	50	PAPS	CD	ACTIVE	4	20	0,2	100	20	8	4	4	2
2	50	DDUE	CD	ACTIVE	4	20	0,2	100	20	8	4	4	2
3	50	SPT	CC	NON-DELAY	8	50	0,5	100	20	8	4	12	12
4	50	RC	AS	NON-DELAY	8	50	0,5	100	20	8	4	12	12
5	50	PAPS	CD	ACTIVE	4	50	0,5	200	200	12	12	12	12
6	50	DDUE	CD	ACTIVE	4	50	0,5	200	200	12	12	12	12
7	50	SPT	CC	NON-DELAY	8	20	0,2	200	200	12	12	4	2
8	50	RC	AS	NON-DELAY	8	20	0,2	200	200	12	12	4	2
9	60	PAPS	CC	ACTIVE	8	50	0,5	100	100	8	8	4	2
10	60	DDUE	AS	ACTIVE	8	50	0,5	100	100	8	8	4	2
11	60	SPT	CD	NON-DELAY	4	20	0,2	100	100	8	8	12	12
12	60	RC	CD	NON-DELAY	4	20	0,2	100	100	8	8	12	12
13	60	PAPS	CC	ACTIVE	8	20	0,2	200	40	12	6	12	12
14	60	DDUE	AS	ACTIVE	8	20	0,2	200	40	12	6	12	12
15	60	SPT	CD	NON-DELAY	4	50	0,5	200	40	12	6	4	2
16	60	RC	CD	NON-DELAY	4	50	0,5	200	40	12	6	4	2
17	70	DDUE	CC	NON-DELAY	4	50	0,2	200	40	8	8	12	6
18	70	PAPS	AS	NON-DELAY	4	50	0,2	200	40	8	8	12	6
19	70	RC	CD	ACTIVE	8	20	0,5	200	40	8	8	4	4
20	70	SPT	CD	ACTIVE	8	20	0,5	200	40	8	8	4	4
21	70	DDUE	CC	NON-DELAY	4	20	0,5	100	100	12	6	4	4
22	70	PAPS	AS	NON-DELAY	4	20	0,5	100	100	12	6	4	4
23	70	RC	CD	ACTIVE	8	50	0,2	100	100	12	6	12	6
24	70	SPT	CD	ACTIVE	8	50	0,2	100	100	12	6	12	6
25	80	DDUE	CD	NON-DELAY	8	20	0,5	200	200	8	4	12	6
26	80	PAPS	CD	NON-DELAY	8	20	0,5	200	200	8	4	12	6
27	80	RC	CC	ACTIVE	4	50	0,2	200	200	8	4	4	4
28	80	SPT	AS	ACTIVE	4	50	0,2	200	200	8	4	4	4
29	80	DDUE	CD	NON-DELAY	8	50	0,2	100	20	12	12	4	4
30	80	PAPS	CD	NON-DELAY	8	50	0,2	100	20	12	12	4	4
31	80	RC	CC	ACTIVE	4	20	0,5	100	20	12	12	12	6
32	80	SPT	AS	ACTIVE	4	20	0,5	100	20	12	12	12	6

\* RC désigne le "Ratio Critique" : voir la description des règles à l'annexe B

Selon ce plan, on a 32 essais, donc 31 degrés de liberté en tout pour l'expérience (sans répétitions). Les facteurs en requièrent  $2 \times (4-1) + 1 \times (3-1) + 10 \times (2-1) = 18$  dl, donc la variation



résiduelle compte  $(31-18) = 13$  degrés de liberté, nombre qui peut augmenter avec le retour des sommes de carrés et des degrés de liberté associés aux facteurs non-significatifs, puis diminuer si certaines interactions sont considérées (analyse "*pull-up*")

## 4 TRAITEMENT ET ANALYSE

### 4.1 Synthèse des résultats

#### 4.1.1 La règle de priorité (facteur A)

Les résultats pour la règle de priorité sont significatifs pour 11 mesures de performance sur 16. Le tableau suivant résume le rang des règles utilisés pour chacune des mesures de performances influencées significativement. Par exemple, PAPS<sup>19</sup> est la règle la plus performante au niveau du temps de passage moyen, suivie dans l'ordre par DDUE, SPT<sup>19</sup>, et RC.<sup>20</sup>

Tableau 25  
Rang des règles de priorité sur les performances

MESURE DE PERFORMANCE	DDUE	PAPS	RC	SPT
Le temps de passage moyen	2 (CD)	1 (CD)	4 (CC)	3 (AS)
L'écart-type des temps de passage	2 (CC)	1 (AS)	4 (CC)	3 (AS)
Le temps de passage maximal	2 (CC)	1 (CD)	4 (CD)	3 (AS)
L'écart-type du niveau d'encours	1 (CC)	2 (CC)	4 (CC)	3 (AS)
L'encours maximal	2 (CC)	1 (CD)	4 (CC)	3 (AS)
Le jeu moyen	1 (CC)	2 (CD)	3 (CC)	4 (CD)
L'écart-type du jeu	1 (CC)	2 (CD)	3 (CD)	4 (CD)
Le jeu maximal	1 (CD)	2 (CD)	4 (CD)	3 (CD)
Le retard moyen	2 (CD)	3 (CD)	1 (CD)	4 (CD)
L'écart-type du retard	1 (CD)	3 (CD)	2 (CD)	4 (CD)
Le retard maximal	1 (CC)	2 (AS)	4 (AS)	3 (CC)
Moyenne	16/11 = 1,4	20/11 = 1,8	37/11 = 3,4	37/11 = 3,4
Fréquence AS	0	2	1	5
Fréquence CC	7	1	5	1
Fréquence CD	4	8	5	5

Dans l'ensemble, les deux règles basées sur l'efficacité donnent de meilleurs résultats que celles basées sur l'efficacité. DDUE est toujours en 1<sup>er</sup> ou 2<sup>e</sup> rang, en compétition avec PAPS, sauf pour le retard moyen et l'écart-type du retard où RC se positionne au 1<sup>er</sup> et 2<sup>e</sup> rang, déclassant ainsi PAPS au 3<sup>e</sup> rang. Enfin, SPT s'avère ici peu performante.

<sup>19</sup> Revoir le mode d'application de PAPS (FCSFS) et SPT à la définition du design expérimental.

<sup>20</sup> Cette notation sera utilisée dans les prochaines sections. Le plus haut rang (1) est accordé au niveau du facteur le plus souhaitable pour une mesure de performance donnée. Par exemple, le rang 1 sera accordé pour le plus HAUT taux d'utilisation moyen et pour le plus PETIT temps de passage moyen. Entre parenthèses, le meilleur système manufacturier pour un niveau particulier de la variable indépendante (colonne) et une mesure de performance donnée (ligne). Le sommaire au bas du tableau compile le total des rangs divisé par la fréquence.

Au niveau du croisement avec les systèmes manufacturiers, on remarque que les CD donnent de bons résultats quelle que soit la règle utilisée, mais se distinguent des AS avec toutes les règles sauf SPT, et se distinguent des CC avec PAPS et SPT.

On peut expliquer ces résultats d'une part par le fait que les performances sont des résultats *pondérés*, donc qui pénalisent fortement les lots importants, qui sont plus susceptibles d'être effectivement repoussés, et d'autre part par le fait que les règles de priorité (dans le cadre de cette expérience), s'appliquent à tous les niveaux de planification, et qu'au niveau de l'ordonnancement, ces règles sont appliquées pour briser l'égalité dans le cadre de l'application des calendriers « active » ou « non-delay ». Dans les faits, il est probable que de meilleures performances seraient atteintes en utilisant des règles différentes selon le niveau de planification, par exemple PAPS ou DDUE au niveau agrégé, et SPT ou RC au niveau le plus détaillé (jalonnement).

#### 4.1.2 Le système à l'étude (facteur B)

Le système manufacturier est significatif pour 12 mesures de performances. Le tableau suivant résume le rang des systèmes manufacturiers utilisés pour chacune des mesures de performances influencées significativement.

Tableau 26  
Rang des systèmes manufacturiers selon la mesure de performance

MESURE DE PERFORMANCE	CD	CC	AS
Le temps de passage moyen	1	2	3
L'écart-type des temps de passage	1	3	2
Le temps de passage maximal	1	2	3
Coût marginal total	1	2	2
Encours moyen	1	2	3
L'écart-type du niveau d'encours	1	2	3
L'encours maximal	1	2	3
Le jeu moyen	1	2	3
L'écart-type du jeu	1	2	3
Le jeu maximal	1	3	2
Le retard moyen	1	2	3
L'écart-type du retard	1	2	3
Le retard maximal	1	3	2
Moyenne	12/12 = 1	27/12 = 2,2	33/12 = 2,8

On constate que le système cellulaire dynamique se trouve au 1<sup>er</sup> rang pour toutes ces mesures de performance, tandis que les cellules classiques se trouvent au 2<sup>e</sup> rang sauf pour 3 mesures de dispersion où les ateliers spécialisés performant mieux.

Ces résultats proviennent sans nul doute de la flexibilité supplémentaire qu'accordent les cellules dynamiques. Notons ici qu'une analyse de variance effectuée en comparant seulement 2 niveaux

(en agrégeant les ateliers spécialisés et les cellules classiques) aurait fait ressortir encore davantage la différenciation par rapport aux cellules dynamiques.

#### 4.1.3 Le type de calendrier (facteur C)

Le type de calendrier est significatif pour 7 mesures de performances. Le tableau suivant résume le rang des calendriers utilisées pour chacune des mesures de performances influencées significativement.

Tableau 27  
Rang des types de calendrier selon la mesure de performance

MESURE DE PERFORMANCE	Active	Non-delay
Le temps de passage moyen	1 (CD)	2 (CD)
L'écart-type des temps de passage	1 (CD)	2 (CD)
L'écart-type du niveau d'encours	1 (CC)	2 (CD)
L'encours maximal	1 (CD)	2 (CD)
Le jeu maximal	2 (CD)	1 (CD)
Le retard moyen	2 (CD)	1 (CD)
Le retard maximal	2 (CD)	1 (CC)
Moyenne	10/7 = 1,4	11/7 = 1,6
Fréquence AS	0	0
Fréquence CC	1	1
Fréquence CD	6	6

On constate que les deux types de calendrier sont très similaires en termes de rang global, mais que la règle non-delay performe mieux dans les mesures basées sur les dates dues.

Ces résultats s'expliquent par le fait que la règle non-delay tend à compresser le calendrier en débutant au plus tôt tout ce qu'il est possible de débiter, tandis que la règle active tend au contraire à expulser du système tout ce qui y est entré.

Les CD se démarquent des autres systèmes pour presque toutes les mesures de performances quelle que soit le type de calendrier utilisé, surpassée dans 2 cas seulement par les CC.

#### 4.1.4 L'horizon considéré (facteur D)

L'horizon considéré significatif pour 9 mesures de performances. Le tableau suivant résume le rang des horizons utilisés pour chacune des mesures de performances influencées significativement.

Tableau 28

Rang des horizons considérés selon la mesure de performance

MESURE DE PERFORMANCE	4 semaines	8 semaines
Le temps de passage moyen	1 (CD)	2 (CD)
L'écart-type des temps de passage	1 (CD)	2 (CD)
Le temps de passage maximal	1 (CD)	2 (CD)
L'écart-type du taux d'utilisation	1 (AS)	2 (AS)
Taux d'utilisation minimum	1 (AS)	2 (CD)
Encours moyen	1 (CD)	2 (CD)
L'écart-type du niveau d'encours	1 (CC)	2 (CD)
L'encours maximal	1 (CD)	2 (CD)
Le retard maximal	2 (CD)	1 (CC)
Moyenne	10/9 = 1,1	17/9 = 1,9
Fréquence AS	2	1
Fréquence CC	1	1
Fréquence CD	6	7

On remarque qu'un horizon plus court donne de meilleures performances dans tous les cas, sauf pour le retard maximal, contrairement à ce qu'il aurait été convenu de penser.

On peut expliquer ce phénomène par le fait qu'en l'absence de règles régissant le lancement en production, l'horizon de configuration joue en quelques sortes ce rôle, en introduisant moins de commandes à chaque réévaluation du système. Dans ces circonstances, un horizon plus court constitue un contrôle plus serré du lancement en production, d'où de meilleurs résultats.

Les CD se démarquent des autres systèmes pour plusieurs mesures de performances quelle que soit l'horizon utilisé, surpassée par les AS pour les mesures de dispersion du taux d'utilisation et par les CC pour le retard maximal.

#### 4.1.5 La taille des lots de transfert interzones (facteur E)

La taille des lots de transferts est significative pour 2 mesures de performances. Le tableau suivant résume le rang des tailles des lots de transferts utilisées pour chacune des mesures de performances influencées significativement.

Tableau 29

Rang des tailles de lots de transferts selon la mesure de performance

MESURE DE PERFORMANCE	20 pièces	50 pièces
Le taux d'utilisation minimum	2 (AS)	1 (CD)
Coût marginal total	2 (CD)	1 (CD)
Moyenne	4/2 = 2	2/2 = 1
Fréquence AS	1	0
Fréquence CC	0	0
Fréquence CD	1	2

On constate que la taille des lots de transfert interzone à 50 pièces donne de meilleurs résultats pour ces deux mesures, et que les CD se démarquent des autres systèmes dans trois cas sur quatre

Par ailleurs, le fait que les autres mesures ne soient pas significativement sensibles à ce facteur peut s'expliquer par l'un ou l'autre des éléments suivants:

- a) les types de calendriers choisis "inhibent" l'effet de la taille des lots de transfert
- b) les niveaux du facteur n'ont pas été paramétrés dans la zone où ils ont un effet significatif
- c) la taille des lots de transfert n'est pas un facteur déterminant

Cette dernière option semble toutefois improbable, mais donne à penser que la *politique* de lots de transfert (ex : lot de transfert = lot de production) pourrait être plus déterminante que la taille elle-même.

#### 4.1.6 Le nombre de produits du carnet de commande (facteur F)

Le nombre de produits est significatif pour 9 mesures de performances. Le tableau suivant résume le rang des différents nombres de produits pour chacune des mesures de performances influencées significativement.

Tableau 30  
Rang du nombre de produits selon la mesure de performance

MESURE DE PERFORMANCE	50 produits	60 produits	70 produits	80 produits
L'écart-type des temps de passage	4 (CD)	2 (CD)	2 (AS)	1 (AS)
Taux d'utilisation moyen	4 (CC)	3 (CC)	2 (CD)	1 (CD)
Taux d'utilisation minimum	4 (CC)	3 (CC)	2 (CD)	1 (CD)
Coût marginal total	1 (CD)	2 (CD)	4 (CD)	3 (CD)
Encours moyen	1 (CD)	2 (CD)	4 (CC)	3 (CC)
L'écart-type du niveau d'encours	4 (CD)	2 (CC)	1 (CC)	3 (CC)
Jeu moyen	4 (CD)	3 (CC)	1 (CC)	2 (CD)
Écart-type du jeu	4 (CD)	3 (CC)	1 (CC)	2 (CD)
Le retard maximal	1 (CC)	2 (AS)	3 (AS)	4 (CC)
Moyenne	27/9 = 3	22/9 = 2,4	19/9 = 2,1	20/9 = 2,2
Fréquence AS	0	1	2	1
Fréquence CC	3	5	4	3
Fréquence CD	6	3	3	5

Les rangs globaux sont très près les uns des autres pour les trois niveaux supérieurs (60, 70 et 80 produits). Seul le niveau à 50 produits donne de piètres résultats, sauf pour le coût marginal total, l'encours moyen et le retard maximal. Les CD se démarquent des autres systèmes avec 50 et 80 produits, surpassée dans 2 cas seulement par les CC.

Ces résultats s'expliquent en examinant les valeurs moyennes des niveaux ; on constate que ce facteur semble soumis à une forme de courbe parabolique, logarithmique ou exponentielle selon la mesure de performance. Ce phénomène découlerait essentiellement de la charge que le nombre de produits apporte sur le système ; à un certain niveau, on atteint une stabilité de la charge, et plusieurs mesures de performances sont influencées par ce degré de charge.

#### 4.1.7 Le coût de manutention linéaire (facteur G)

Le coût de manutention linéaire est significatif pour 13 mesures de performances. Le tableau suivant résume le rang des différents coûts de manutention linéaire utilisés pour chacune des mesures de performances influencées significativement.

Tableau 31  
Rang des coûts de manutention selon la mesure de performance

MESURE DE PERFORMANCE	0,2\$ /100pi	0,5\$ /100pi
Temps de passage moyen	2 (CD)	1 (CC)
Écart-type du temps de passage	2 (CD)	1 (CD)
Temps de passage maximal	2 (CD)	1 (CD)
Taux d'utilisation moyen	2 (CD)	1 (AS)
Coût marginal total	1 (CD)	2 (CD)
Encours moyen	2 (CD)	1 (CC)
L'écart-type du niveau d'encours	2 (CD)	1 (CD)
Encours maximal	2 (CD)	1 (CC)
Jeu moyen	1 (CC)	2 (CD)
Écart-type du jeu	1 (CC)	2 (CD)
Retard moyen	2 (CD)	1 (CC)
Écart-type du retard	2 (CD)	1 (CC)
Le retard maximal	2 (CD)	1 (CC)
Moyenne	23/13 = 1,8	16/13 = 1,2
Fréquence AS	0	1
Fréquence CC	2	4
Fréquence CD	9	6

D'abord, on note que le coût marginal total diminue lorsque le coût de manutention linéaire diminue (constat quasi-trivial). Cependant, presque toutes les autres mesures sont meilleures lorsque le coût de manutention linéaire est plus élevé ; ce facteur devrait donc plutôt être considéré de façon relative.

En effet l'explication résiderait dans le fait que des coûts de manutention linéaires qui "déclassent" de façon plus importante les coûts de configuration justifient plus souvent les reconfigurations, et favorisent donc plusieurs mesures de performances. Ainsi un système caractérisé par des coûts de configuration faibles, voire négligeables, n'optimiserait la position des machines qu'en fonction des coûts de manutention des produits, rendant le système particulièrement sensible aux flux des produits.

Ce dernier élément rend très intéressant le système manufacturier "avec mémoire", c'est-à-dire celui où une fois qu'une machine (ou un type de machine) a été placée au moins une fois dans une zone, les coûts de configuration fixes pour cette combinaison machine-zone sont diminués ou même nuls. D'ailleurs, on remarque que les CD se distinguent des CC et AS pour les deux niveaux du facteur G (coût de manutention linéaire).

Enfin, on remarque que le jeu moyen et son écart-type sont au 1<sup>er</sup> rang avec un coût de manutention linéaire paramétré au niveau inférieur. À cet égard, les faibles valeurs observés pour les retards comparativement à celles observées pour le jeu nous indiquent que celui-ci est essentiellement constitué de lots en avance sur la date livrable. Là encore, on pourrait plutôt considérer le fait d'être en avance comme un avantage, et dans ce cas, des coûts de manutention supérieurs (ou des coûts de configuration inférieurs) seraient plus avantageux.

#### 4.1.8 La taille moyenne des commandes (facteur H1)

La taille moyenne des commandes est significative pour 13 mesures de performances. Le tableau suivant résume le rang des différentes tailles moyennes des commandes utilisées pour chacune des mesures de performances influencées significativement.

Tableau 32  
Rang de la taille des commandes selon les mesures de performance

MESURE DE PERFORMANCE	100 pièces	200 pièces
Temps de passage moyen	1 (CD)	2 (CD)
Temps de passage maximal	1 (CD)	2 (CD)
Taux d'utilisation moyen	2 (AS)	1 (CD)
Écart-type du taux d'utilisation	1 (AS)	2 (AS)
Taux d'utilisation minimum	2 (AS)	1 (AS)
Encours moyen	1 (CC)	2 (CD)
Encours maximal	1 (CC)	2 (CD)
Jeu moyen	2 (CD)	1 (CC)
Écart-type du jeu	2 (CD)	1 (CD)
Jeu maximal	1 (CD)	2 (CD)
Retard moyen	1 (CD)	2 (CD)
Écart-type du retard	1 (CD)	2 (CD)
Le retard maximal	1 (CC)	2 (CD)
Moyenne	17/13 = 1,3	22/13 = 1,7
Fréquence AS	3	2
Fréquence CC	2	1
Fréquence CD	6	8

On constate que le rang varie beaucoup selon la mesure de performance.

Ces résultats s'expliquent par le fait que la taille moyenne des commandes influence directement la charge globale du système. Ainsi, par exemple, une charge plus faible donnera un meilleur temps de passage moyen, mais un moins bon taux d'utilisation moyen. De plus, on constate que



les CD se distinguent des CC et AS pour les deux niveaux du facteur H1 (taille moyenne des commandes), mais plus particulièrement pour le niveau « 200 pièces ».

#### 4.1.9 L'étendue de la taille des commandes (facteur H2)

L'étendue de la taille des commandes est significative pour 2 mesures de performances. Le tableau suivant résume le rang des différentes étendues de la taille des commandes utilisées pour chacune des mesures de performances influencées significativement.

Tableau 33  
Rang des étendues de taille de commande selon la mesure de performance

MESURE DE PERFORMANCE	20%	100%
Jeu moyen	2 (CD)	1 (CC)
Écart-type du jeu	2 (CD)	1 (CC)
Moyenne	$4/2 = 2$	$2/2 = 1$
Fréquence AS	0	0
Fréquence CC	0	2
Fréquence CD	2	0

On constate que ce facteur n'influence que 2 mesures liés au jeu, et que les performances sont meilleures lorsque le facteur augmente, c'est-à-dire que plus la taille moyenne des commandes varie d'un produit à l'autre, meilleures sont les performances. De plus, les CD sont plus performantes au premier niveau du facteur (20%), tandis que les CC se distinguent au deuxième niveau (100%). Toutefois, l'explication des résultats reste difficile à identifier.

#### 4.1.10 La durée totale moyenne des cycles de vie (facteur I1)

La durée totale moyenne des cycles de vie est significative pour 15 mesures de performances. Le tableau suivant résume le rang des différentes durées totales moyennes des cycles de vie utilisées pour chacune des mesures de performances influencées significativement.

Tableau 34  
Rang des durées moyennes de cycle de vie  
selon la mesure de performance

MESURE DE PERFORMANCE	8 sem.	12 sem.
Temps de passage moyen	1 (CD)	2 (CD)
Écart-type du temps de passage	1 (CD)	2 (CD)
Temps de passage maximal	1 (CD)	2 (CD)
Taux d'utilisation moyen	2 (AS)	1 (AS)
Écart-type du taux d'utilisation	1 (AS)	2 (CD)
Taux d'utilisation minimum	2 (CD)	1 (AS)
Coût marginal total	1 (CC)	2 (CD)
Encours moyen	1 (CD)	2 (CD)
Écart-type de l'encours	1 (CD)	2 (CD)
Encours maximal	1 (CD)	2 (CD)
Jeu moyen	2 (CD)	1 (CD)
Écart-type du jeu	2 (CD)	1 (CD)
Jeu maximal	1 (CD)	2 (CD)
Écart-type du retard	1 (CD)	2 (CD)
Le retard maximal	1 (CD)	2 (CD)
Moyenne	19/15 = 1,3	26/15 = 1,7
Fréquence AS	2	2
Fréquence CC	1	0
Fréquence CD	12	13

On constate que les mesures de performances influencées et les rangs pour ce facteur ressemblent fortement au profil qu'on retrouve pour le facteur H1 (taille moyenne des commandes). De la même façon, on peut donc présumer que la durée des cycles de vie des produits influence la charge globale du système, expliquant ainsi les différents résultats. Dans le même ordre d'idée, on constate que les CD se distinguent clairement des CC et AS pour les deux niveaux du facteur I1 (durée moyenne des cycles de vie).

#### 4.1.11 L'étendue de la durée totale des cycles de vie (facteur I2)

L'étendue de la durée totale moyenne des cycles de vie est significative pour 5 mesures de performances. Le tableau suivant résume le rang des différentes étendues des durées totales moyennes des cycles de vie utilisées pour chacune des mesures de performances influencées significativement.

Tableau 35  
Rang des étendues des cycles de vie selon la mesure de performance

MESURE DE PERFORMANCE	50%	100%
Écart-type du temps de passage	2 (CD)	1 (CD)
Taux d'utilisation moyen	2 (AS)	1 (AS)
Jeu maximal	2 (CD)	1 (CD)
Retard moyen <sup>(1)</sup>	2 (CD)	1 (CC)
Écart-type du retard <sup>(1)</sup>	2 (CD)	1 (CD)
Moyenne	10/5 = 2	5/5 = 1
Fréquence AS	1	1
Fréquence CC	0	1
Fréquence CD	4	3

(1) Le facteur seul n'est pas significatif pour ces mesures de performances, mais est compris dans une interaction significative.

On constate que les performances sont meilleures lorsque le facteur augmente, c'est-à-dire que plus la durée des cycles de vie varie d'un produit à l'autre, meilleures sont les performances. De plus, les CD se distinguent des CC et AS pour les deux niveaux du facteur I2 (étendue de la durée totale des cycles de vie). Toutefois, l'explication des résultats reste difficile à identifier.

#### 4.1.12 Le délai moyen entre date due et prise de commande (facteur J1)

Le délai de préavis moyen est significatif pour 14 mesures de performances. Le tableau suivant résume le rang des différents délais de préavis moyens utilisées pour chacune des mesures de performances influencées significativement.

Tableau 36  
Rang des délais de préavis selon la mesure de performance

MESURE DE PERFORMANCE	4 sem.	12 sem.
Temps de passage moyen	1 (CD)	2 (CD)
Écart-type du temps de passage	1 (CD)	2 (CD)
Temps de passage maximal	1 (CD)	2 (CD)
Taux d'utilisation moyen	2 (AS)	1 (AS)
Écart-type du taux d'utilisation	1 (AS)	2 (AS)
Encours moyen	1 (CD)	2 (CD)
Écart-type de l'encours	2 (CD)	1 (CD)
Encours maximal	1 (CD)	2 (CD)
Jeu moyen	1 (CC)	2 (CD)
Écart-type du jeu	1 (CD)	2 (CD)
Jeu maximal	1 (CD)	2 (CD)
Retard moyen	1 (CD)	2 (CD)
Écart-type du retard	1 (CD)	2 (CD)
Le retard maximal	1 (CD)	2 (CD)
Moyenne	16/14 = 1,1	26/14 = 1,9
Fréquence AS	2	2
Fréquence CC	1	0
Fréquence CD	11	12

On peut voir qu'hormis pour le taux d'utilisation moyen et l'écart-type de l'encours, les meilleures performances se situent au niveau inférieur, contrairement à ce qu'il serait attendu.

Cet état de faits semble soulever la problématique du contrôle de lancement en production. En effet, de façon similaire à l'horizon considéré (facteur D), les délais de préavis agissent en quelques sortes comme un régulateur du lancement en production en l'absence de règles spécifiques à cet égard. Vu sous cet angle, des délais plus courts constitueraient un contrôle plus serré, d'où de meilleures performances, particulièrement en ce qui a trait aux mesures basées sur les dates dues (jeu et retard). De plus, les CD se distinguent clairement des autres systèmes quel que soit le niveau du facteur principal, sauf en ce qui a trait aux mesures de performance basées sur le taux d'utilisation des ressources.

#### 4.1.13 L'étendue des délais de préavis (J2)

L'étendue des délais de préavis est significative pour 7 mesures de performances. Le tableau suivant résume le rang des différentes étendues des délais de préavis utilisées pour chacune des mesures de performances influencées significativement.

Tableau 37  
Rang des étendues des délais de préavis selon la mesure de performance

MESURE DE PERFORMANCE	50%	100%
Écart-type du temps de passage	1 (CD)	2 (CD)
Temps de passage maximal	1 (CD)	2 (CD)
Écart-type de l'encours	1 (CD)	2 (CD)
Encours maximal	1 (CD)	2 (CD)
Jeu moyen	1 (CD)	2 (CD)
Écart-type du jeu	1 (CD)	2 (CD)
Le retard maximal	2 (AS)	1 (CC)
Moyenne	8/7 = 1,1	13/7 = 1,9
Fréquence AS	1	0
Fréquence CC	0	1
Fréquence CD	6	6

On constate à la lumière de ce tableau que des délais de préavis plus stables donnent en général de meilleures performances en ce qui a trait à la notion de dispersion.

Ces résultats s'expliquent simplement par le fait que moins les délais de préavis varient, moins l'urgence varie d'une commande à l'autre, favorisant ainsi un traitement plus "standard" pour toutes les commandes. De plus, on remarque que les CD se distinguent des CC et AS aux 2 niveaux toutes les mesures de performances à l'exception du retard maximal.

#### 4.1.14 Interactions

1) Système (B) et durée moyenne des cycles de vie (I1) sur l'écart-type du taux d'utilisation

La durée des cycles de vie des produits tend à inverser l'effet du système sur l'écart-type du taux d'utilisation. Bien qu'au niveau supérieur de I1 (12 semaines), toutes les valeurs moyennes observées sont supérieures à celles observées au niveau inférieur (8 semaines), on note que l'effet de I1 s'accroît lorsqu'on passe du système cellulaire dynamique au système cellulaire classique, puis au système en ateliers spécialisés. C'est donc dire que l'écart-type du taux d'utilisation est moins affecté par la durée des cycles de vie pour un mode cellulaire dynamique que pour les deux autres modes de production.

2) Taille moyenne des commandes et durée moyenne des cycles de vie sur l'écart-type du taux d'utilisation

La hausse de la taille moyenne des commandes tend à diminuer l'effet de la hausse du cycle de vie des produits sur l'écart-type du taux d'utilisation. Bien que toutes les valeurs moyennes observées au niveau supérieur de H1 (200 pièces) soient supérieures à celles observées au niveau inférieur (100 pièces), on note que l'effet de I1 s'amoindrit lorsqu'on passe d'une taille moyenne des commandes à 100 pièces à une taille de 200 pièces.

### 3) Durée moyenne des cycles de vie et délai moyen de préavis sur l'écart-type du taux d'utilisation

La hausse de la durée moyenne des cycles de vie tend à diminuer l'effet de la hausse du délai de préavis sur l'écart-type du taux d'utilisation. Bien que toutes les valeurs moyennes observées au niveau supérieur de I1 (12 semaines) soient supérieures à celles observées au niveau inférieur (8 semaines), on note que l'effet du délai de préavis (J1) s'amointrit lorsqu'on passe de cycles de vie de 8 semaines en moyenne à 12 semaines en moyenne.

### 4) Système et étendue des durées de cycles de vie sur le retard moyen

La hausse de l'étendue des durées de cycles de vie inverse l'effet du système sur le retard moyen. On constate qu'au niveau du retard moyen, le système le plus sensible à une hausse de la variabilité des durées des cycles de vie est le système cellulaire classique. Viennent ensuite les ateliers spécialisés, et enfin les cellules dynamiques. C'est donc dire que le retard moyen est moins affecté par une hausse de la variabilité des durées des cycles de vie pour un système cellulaire dynamique que pour les deux autres systèmes, sans compter qu'en moyenne, ce retard est moins marqué pour les cellules dynamiques.

### 5) Taille moyenne des commandes et étendue des durées de cycles de vie sur l'écart-type du retard

La hausse de la taille moyenne des commandes inverse l'effet de la hausse de l'étendue des durées de cycles de vie sur l'écart-type du retard. Bien que toutes les valeurs moyennes observées au niveau supérieur de H1 (200 pièces) soient supérieures à celles observées au niveau inférieur (100 pièces), on note que l'effet de I2 s'inverse lorsqu'on passe d'une taille moyenne des commandes à 100 pièces à une taille de 200 pièces.

### 6) Système et étendue des durées de cycles de vie sur l'écart-type du retard

La hausse de l'étendue des durées de cycles de vie inverse l'effet du système sur le retard moyen. On constate qu'au niveau de l'écart-type du retard, le système le plus sensible à une hausse de la variabilité des durées des cycles de vie est le système cellulaire classique. Viennent ensuite les ateliers spécialisés, et enfin les cellules dynamiques. C'est donc dire que l'écart-type du retard est moins affecté par une hausse de la variabilité des durées des cycles de vie pour un système cellulaire dynamique que pour les deux autres systèmes, sans compter qu'en moyenne, cet écart-type est moins marqué pour les cellules dynamiques.

## 5 CONCLUSION ET RECOMMANDATIONS

### 5.1 Conclusion

Cette recherche a permis de mieux comprendre les systèmes manufacturiers cellulaires dynamiques, et tend à démontrer leur supériorité par rapport aux autres modes de production communément utilisés dans un contexte de mix-produit varié, et plus particulièrement en contexte turbulent.

En effet, comme le démontre la synthèse des résultats, le système manufacturier est un facteur significatif pour 12 mesures de performances, et pour chacune de ces mesures de performances, les SMCD surpassent les AS et les SMCC. Parmi les mesures les plus souhaitables dans un contexte de Juste-À-Temps, citons le temps de passage moyen et maximal, l'encours moyen et maximal, ainsi que le retard moyen et maximal, sans bien sûr oublier le coût marginal total.

En croisant la variable « système manufacturier » avec chacun des autres facteurs dans l'analyse des résultats, on constate qu'en général, les Cellules Dynamiques surpassent les Ateliers Spécialisés et les Cellules Classiques, quel que soit le niveau de l'autre facteur d'analyse. On en arrive donc à la conclusion que les cellules dynamiques sont moins sensibles aux variations des facteurs externes (ex : taille des commandes) et aux choix des règles de gestion (ex : type de calendrier), et restent souvent un bon, sinon le meilleur choix lorsqu'on considère les performances dans leur ensemble.

### 5.2 Avenues de recherche

Les résultats de cette recherche indiquent que plusieurs aspects du concept cellulaire dynamique méritent d'être explorés plus à fond afin de mieux l'exploiter. Selon l'auteur, ces aspects sont ;

Identifier des algorithmes et/ou heuristiques pertinents pour le module #1 (cheminements et affectations) et les comparer.

Améliorer le temps de résolution pour le module #2 : l'expérimentation proprement dite s'est avérée particulièrement fastidieuse en raison de la nature NP-complet du problème d'affectation quadratique. Afin d'alléger la résolution dans la pratique, on pourrait ;

- a) Identifier les groupes de machines par où les pièces passent toujours selon la même séquence et les modéliser comme une seule.
- b) Distinguer les secteurs de l'entreprise entre lesquels les liens sont négligeables, et modéliser chacun de ces secteurs comme un système en soi.

- c) Écarter les produits ou familles de produits fabriqués de façon satisfaisante et relativement stable au sein de cellules classiques ou lignes d'assemblage.
- d) Considérer seulement la partie la plus importante des flux, et négliger les échanges peu importants.

Développer un module de contrôle du lancement en production (sous-module du module #1) qui pourrait, par exemple, éviter de soumettre au module suivant les flux résultants de commandes dont la date livrable est très éloignée.

Étudier l'impact d'une mémoire partielle ou totale sur les performances du système manufacturier cellulaire dynamique (ex : coûts de configuration dégressifs selon un taux de  $x$  à 100%).

Étudier l'impact des exclusions de machines sur les performances du système manufacturier cellulaire dynamique.

Étudier l'impact d'un système avec pannes sur les performances du système manufacturier cellulaire dynamique.

Étudier l'impact d'un système avec temps de mises en course non-négligeables sur les performances du système manufacturier cellulaire dynamique.

Étudier l'impact d'un système soumis à des délais de manutention sur les performances du système manufacturier cellulaire dynamique.

Identifier ou développer des procédures d'ordonnancement et jalonnement recourant aux technologies de groupes pour cellules non-exclusives afin de former des familles et tester ces procédures selon diverses combinaisons de paramétrage des variables qui en feront partie (ex : règle d'ordonnancement intrafamille et interfamille).

Développer des procédures de jalonnement qui permettent de tenir compte des délais de reconfiguration et établir le meilleur moment dans l'horaire pour reconfigurer chaque machine.

Développer des variables de contrôle (module #4) et tester l'impact de ces variables en fonction de divers niveaux de turbulence de la demande. Idéalement, les niveaux des paramètres devraient être auto-adaptatifs.



## 6 RÉFÉRENCES

1. BAILLARGEON, G., (1993), Expérimentation en milieu industriel : Méthodes Taguchi, Les Éditions SMG, 249pp.
2. BAILLARGEON, G., (1994), Maîtrise statistique des procédés, Les Éditions SMG, 361pp.
3. BAKER, K. R., (1974), Introduction to sequencing and scheduling, John Wiley and Sons Inc., 305pp.
4. BERGAMASCHI, D., et al. (1997) Order review and release strategies in a job shop environnement : a review and a classification, International Journal of Production Reasearch, vol.35, no.2, pp.399-420
5. BESSANT, J. et B. HAYWOOD (1988) Islands, archipelagoes and continents. Progress on the road to computer-integrated manufacturing. Research Policy, vol.17, pp.349-362
6. BURBIDGE, J. L., (1975) The Introduction of Group Technology, John Wiley & Sons, 1975.
7. BURBIDGE, J. L., (1979) Group Technology in the Engineering Industry, Mechanical Engineering Publications, 1979.
8. CHEN, I.J. et C.H. CHUNG (1991), Effects of loading and routing decisions on performance of flexible manufacturing systems, International Journal of Production Reasearch, vol.29, no.11, pp.2209-2225
9. CHOBINEH, F. (1988), A framework for the design of cellular manufacturing systems, International Journal of Production Reasearch, vol.26, no.7, pp.1161-1172
- CHOO, S. (1994), Production system changes in the Korean consumer electronics sector. Growth and Change, vol.25, pp.165-182
10. DROLET, J., B. MONTREUIL et C.L. MOODIE, (1989), Scheduling Factories of the future, Journal of Mechanical Working Technology, vol.20, pp.183-194, 1989
11. DROLET, J., B. MONTREUIL et C.L. MOODIE, (1989), Decision architecture for scheduling virtual cellular manufacturing systems, Compte rendu de IFAC International Workshop on Decisionnall structures in Automated Manufacturing, Gène, Italie, pp.103-112, Septembre1989
12. DROLET, J. et al. (1995), A World class Manufacturing Strategy, 1994 Annual International Conference on Industry Engeneering and Management Systems, Cocoa Beach, Floride, Mars 1994.
13. DROLET, J., B. MONTREUIL et C.L. MOODIE, (1995), Scheduling Framework for Virtual Cellular Manufacturing Systems, International Journal of Manufacturing System Design, World Scientific Publishing Company, vol.1, no.4, pp.351-365

14. FRANCIS, L.R., L.F. MCGINNIS Jr et J.A.WHITE (1992), In : Facility Layout and Location : An Analytical Approach, Prentice Hall, Englewood Cliffs, NJ
15. FLYNN, B. B. et F. R. JACOBS, (1986), A Simulation Comparison Group Technology with Traditional Job Shop Manufacturing, International Journal of Production Research, vol.24, no.5, pp.1171-1192
16. FLYNN, B. B. et F. R. JACOBS, (1987), An experimental comparison of Cellular (Group Technology) Layout with Process layout, Decision Sciences, vol.18, no.4, pp.562-581
17. FRENCH, S., (1982), Sequencing and Scheduling : An introduction to the Mathematics of the Job-Shop, John Wiley & Sons, 254pp.
18. GREENE, T.J. et R.P. SADOWSKI, (1982), Cellular Manufacturing Control, Journal of Manufacturing Systems, vol.2, no.2, pp.137-145
19. GREENE, T.J. et R.P. SADOWSKI, (1984), Cellular Manufacturing Control, Journal of Manufacturing Control, vol.2, no.2, pp.137-145
20. GREENE, T.J. et R.P. SADOWSKI, (1984), A Review of Cellular Manufacturing Assumptions, Advantages and Design Techniques, Journal of Operations Management, vol.4, no.2, February 1984
21. GREENE, T.J. et C.M. CLEARY, (1985), Is Cellular Manufacturing Right For You ?, 1985 Annual International Industrial Engineering Conference Proceedings, pp.181-190
22. GUPTA, D. et J. A. BUZACOTT (1989) A framework for understanding flexibility of manufacturing systems. Journal of Manufacturing System, vol.8, pp.89-97
23. GUPTA, Y. P., G. W. EVANS et M. C. GUPTA (1991) A review of Multi-criterion Approaches to FMS Scheduling problem, International Journal of Production Economics, vol.22, no.1, pp.13-31
24. HARVEY S., (1992), Modélisation et implantation orienté organisme d'un système manufacturier cellulaire virtuel, Essai de maîtrise, Faculté des sciences et de l'administration de l'Université Laval, Québec, QC, Canada
25. HAYES, R. H. et G.P. PISANO, (1994), Beyond World-Class : The new manufacturing strategy, Harvard Business Review, pp. 77-86, Jan-Feb
26. HERAGU, S. S. et J. S. KOCHHAR (1994), Material handling issues in manufacturing systems, présenté au 1994 International Mechanical Engineering Congress and Exposition, The Materials Handling Engineering Division 75th Anniversary American Society of Mechanical Engineers, Material Handling Division, MHD 2 1994. ASME, New York, NY, USA. pp.9-13

27. HICKS, C. R., (1993) *Fundamental Concepts in the Design of Experiments*, 4e édition, Holt, Rinehart et Winston Inc., 501 pages
28. HYER, N. J., (1984), The Potential of Group Technology for U.S. Manufacturing, *Journal of Operation Mananement*, vol.4, pp.183-201
29. INMAN, R. A., (1991), Flexible manufacturing systems : Issues and Implementation, *Industrial Management*, vol.33, no.4, pp.7-11
30. IRANI, S.A., P.H. COHEN, et T.M. CAVALIER (1992), Design of Cellular Manufacturing Systems, *ASME Journal of Engineering for Industry*, vol.114, no.3, pp.352-361
31. IRANI, S.A., (1993), Some new insights on the design of cellular manufacturing systems, 2nd *Industrial Engineering Reasearch Conference Proceedings*, IIE, pp.51-55, 1993
32. IRANI, S.A., T.M. CAVALIER, et P.H. COHEN (1993), Virtual Manufacturing Cells : Exploiting Layout Design and Intercell Flows for the Machine Sharing Problem, *International Journal of Production Reasearch*, vol.31, no.4, pp.791-810
33. JAIKUMAR, R., (1986), Postindustrial Manufacturing, *Harvard Buisness Review*, Novembre-Décembre, 1986
34. KING., J. R. et V. NACORNCHAI (1982), Machine-Component Group Formation in Group Technology : Review and Extension, *International Journal of Production Research*, vol.20, no.2, pp.117-133.
35. KINNEY, H.D., et L. F. MCGINNIS (1987), Design and Control of manufacturing Cells, *Industrial Engineering*, pp.28-38
36. KNUDSEN, D. C., F. R. JACOBS, D. CONWAY, et M. K. BLAKE (1994) A survey of group technology adoption the American Midwest, *Growth and Change*, vol.25, pp.183-205
37. KUSIAK, A. et S. HERAGU, (1987), Group Technology, *Computers in Industries*, no.9, pp.83-91
38. MARCOTTE, S., MONTREUIL, B. (1995), Design of Holographic Layout for Agile Flow Shops, *Actes du Congrès International de Génie Industriel de Montréal*, Montréal, Québec, Octobre 95, Vol.2, pp.929-938, Éditions de l'École Polytechnique de Montréal
39. MARCOUX, Y., J. DROLET et G. ABDULNOUR (1997), Studying the performance of a dynamic cellular manufacturing system, présenté au 21e Congrès de Computers and Industrial Engineering, San Juan, Puerto Rico, Mars 97
40. MASAYUMA, A., (1985), Idea and practice of flexible manufacturing system of Toyota, *Flexible Manufacturing Recent Developpements in FMS, Robotics, CAD/CAM, CIM*, Elseiver, pp.141-152

41. McAULLEY, J. (1972), Machine Grouping for Efficient Production, *The Production Engineer*, vol.52, no.2, pp.53-57
42. McLEAN, C. R., BLOOM, H. M. et HOPP, T. H. (1982), The virtual manufacturing cell, *Proceedings of Fourth IFAC/IFIP Conference on Information Control Problems in Manufacturing Technology*, Gaithersberg, MD, USA, pp.207-214
43. MILGROM, P. et J. ROBERTS (1990) The economics of modern manufacturing : Technology, strategy, and organization. *The American Economic Review*, vol.80, pp.511-528
44. MONTREUIL, B., U. VENKATADRI et P. LEFRANÇOIS, (1991), Holographic layout of manufacturing systems, présenté au 19th IIE Systems Integration Conference, Orlando, Florida, USA, Oct
45. MONTREUIL, B, J. DROLET et P. LEFRANÇOIS, (1992), Conception et gestion de systèmes manufacturiers cellulaires virtuels, Challenging Traditionnal Thinking Annual International Conference 1992, *Proceedings of the APICS 35th International Conference and exhibition*, Montréal, Qc, Canada, publ. by APICS, Falls Church. VA, USA, pp.410-414, 1992
46. MONTREUIL, B., U. VENKATADRI et H.D.Ratliff, Generating a layout from Design Skeleton ; An Efficient Design Model, (1993b) *IIE Transactions*, vol.25, no.1, pp.3-16
47. MUSCATELLO, M., et T. J. GREENE (1990) Hurdles of manufacturing systems implementations, *Computers & Industrial Engineering*, vol.19, no.1-4, pp.136-139
48. OAKEY, R. P., ET P. N. O'FARRELL (1992) The regional extent of computer numerically controlled machine tool adoption and post-adoption success in small British mechanical engineering firms. *Regional Studies*, vol.26, pp.163-176.
49. PRITSKER, A. A. B., (1986) *Introduction to simulation and SLAMII*, 3e édition, John Wiley & Sons, 839 pages
50. RAJMANI, D., N. SINGH and Y.P. ANEJA, (1992), A model for cell formation in manufacturing systems with sequences dependence, *International Journal of Production Research*, vol.30, no.6, pp.1227-1235
51. RAMUDHIN, A. et R.ROCHETTE, (1991), Just-In-Time practices in an unstable environment : A simulation study, Document disponible au département de génie industriel de l'UQTR, CP 500, Trois-Rivières, Québec, Canada
52. RHEAULT, M., J.DROLET and G. ABDULNOUR, (1995), Physically Reconfigurable Virtual Cells : A Dynamic Model for a Highly Dynamic Environment, *Computers and Industrial Engineering*, vol.29, no.1-4, pp.221-225

53. RHEAULT, M., J.DROLET et G. ABDULNOUR, (1996), Cellular manufacturing evolution, présenté au 19e Congrès de Computers and Industrial Engineering, vol.31, no.1-2, pp.139-142
54. RHEAULT, M., J.DROLET and G. ABDULNOUR, (1996b), Dynamic Cellular Manufacturing System (DCMS), présenté au 19e Congrès de Computers and Industrial Engineering, vol.31, no.1-2, pp.139-142
55. RHEAULT, M., (1999), Les systèmes manufacturiers cellulaires dynamiques, un concept pour PME, Essai de maîtrise, École de génie de l'Université du Québec à Trois-Rivières, Trois-Rivières, QC, Canada (à paraître)
56. ROSS, P.J., (1988), Taguchi Techniques for Quality Engineering, McGraw-Hill, 279pp.
57. ROY, R., (1990), A primer on the Taguchi Method, Van Nostrand Reinhold, 247pp.
58. RUBEN, R. A., C. T. MOSIER and F. MAHMOODI, (1993), A comprehensive analysis of group scheduling heuristics in a job shop cell, International Journal of Production Research, vol.31, pp.1483-1509
59. RUTHERFORD, T. (1994) Production politics and flexible manufacturing in the South Wales motor components sector. Growth and Change, vol 25, pp.206-222
60. SAIFALLAH, B. (1992) Intelligent simulation for flexible manufacturing systems : an integrated approach, Computers & Industrial Engineering, vol.22, no.3, pp.297-311
61. MARTINEZ SANCHEZ, A., (1994), FMS in Spanish industry : Lessons from experience, Integrated Manufacturing Systems, vol.5, no.2, pp.28-36
62. SCHONBERGER, R. J., (1986) World Class Manufacturing, The Free Press, New York, NY, 1986.
63. SCHONBERGER, E. (1989) Some dilemmas of automation : Strategic and operational aspects of technological change in production. Economic Geography, vol.65, pp.245-262
64. SEIFODDINI, H. et M. DJASSEMI (1996), Sensitivity analysis in cellular manufacturing system in the case of product mix variation, présenté au 19e Congrès de Computers and Industrial Engineering, vol.31, no.1-2, pp.163-167
65. SHANNON, R. E., (1975), Systems Simulation : The Art and Science, Prentice-Hall, 1975.
66. SHANKER, K. et A. K. AGRAWAL (1991), Loading Problem and Resource Considerations in FMS : A Review, International Journal of Production Economics, vol.25, no.1-3, pp. 111-119
67. SHAFER, S. M., et J. R. MEREDITH, (1993), An empirically-based simulation study of functional versus cellular layouts with operations overlapping, International Journal of Operations and Production Management, 1993, vol.13, no2, pp.47-62

68. TOMPKINS, J. A. ET J. A. WHITE (1984) Facilities planning, John Wiley & Sons, 675 pages
69. TOMBAK, M. et A. de MEYER (1988), Flexibility and FMS : An empirical appraisal, IEEE Transactions on Engineering Management, vol.35, pp.101-107.
70. UPTON, D. M. (1995) What really makes factories flexible?, Harvard Business Review, vol.73, no.4, pp.74-79
71. VENKATESAN, R., (1990) Cummins Engine Flexes its Factory, Harvard Business Review, vol.66, no.2, , pp.120-127
72. WEMMERLOV, U. ET N. L. HYER, (1987) Research Issues In Cellular Manufacturing, International Journal of Production Research, vol.25, no.3, pp.413-431.
73. WEMMERLOV, U., (1988) Production Planning and Control Procedures for Cellular Manufacturing Systems : Concepts and Practice, Falls Church, VA, American Production and Inventory Control Society, 1988.
74. WISNER, J. D., (1995) A review of the order release policy research, International Journal of Operations and Production Management, vol.15, no.6, pp.25-40.

## ANNEXE A

Heuristiques de génération des calendriers de types active et *non-delay*

Définissons d'abord quelques variables ;

$P_t$  : le calendrier partiel, constituée des " $t-1$ " opérations déjà planifiées

$S_t$  : le groupe des ordres de fabrication planifiables à l'étape " $t$ ". Ainsi, toutes les opérations devant précéder celles se trouvant dans le groupe  $S_t$  se retrouvent dans  $P_t$

$\sigma_k$  : le début le plus hâtif auquel l'opération  $o_k$  de  $S_t$  peut être débutée

$\phi_k$  : la fin la plus hâtive à laquelle l'opération  $o_k$  de  $S_t$  peut être terminée, ce qui correspond à  $\sigma_k + p_k$ , où  $p_k$  est le temps requis pour traiter  $o_k$

#### **Calendrier actif (Giffler and Thompson)**

1. Initialisation ( $t = 1$ ) : Former  $S_1$ , le groupe d'ordres de fabrication n'ayant pas de prédécesseurs, c'est à dire la première opération de chaque commande.
2. Trouver  $\phi^* = \min (o_k)$  dans  $S_k \{ \phi_k \}$  et la machine  $M^*$  sur laquelle  $\phi^*$  est effectué. S'il y a un choix pour  $M^*$ , choisir arbitrairement.
3. Choisir une opération  $o_j$  dans  $S_t$  tel que ;
  - Elle requiert  $M^*$ , et
  - $\sigma_j < \phi^*$
4. a) ajouter  $o_j$  à  $P_t$ , formant ainsi  $P_{t+1}$   
 b) retirer  $o_j$  d groupe  $S_t$ , et former  $S_{t+1}$  en ajoutant l'opération qui succède  $o_j$  (à moins que  $o_j$  soit la dernière opération de la commande).  
 c) incrémenter  $t$  de 1
5. Si il reste des opérations qui n'ont pas encore été planifiées, retourner à l'étape #2. Sinon, arrêter.



### Calendrier non-delay

1. Initialisation ( $t = 1$ ) : Former  $S_1$ , le groupe d'ordres de fabrication n'ayant pas de prédécesseurs, c'est à dire la première opération de chaque commande.
2. Trouver  $\sigma^* = \min (o_k)$  dans  $S_k \{\sigma_k\}$  et la machine  $M^*$  sur laquelle  $\sigma^*$  est effectué. S'il y a un choix pour  $M^*$ , choisir arbitrairement.
3. Choisir une opération  $o_j$  dans  $S_t$  tel que ;
  - Elle requiert  $M^*$ , et
  - $\sigma_j = \sigma^*$
4.
  - a) additionner  $o_j$  à  $P_t$ , formant ainsi  $P_{t+1}$
  - b) retirer  $o_j$  d groupe  $S_t$ , et former  $S_{t+1}$  l'opération qui succède  $o_j$  (à moins que  $o_j$  soit la dernière opération de la commande).
  - c) incrémenter  $t$  de 1
5. Si il reste des opérations qui n'ont pas encore été planifiées, retourner à l'étape #2. Sinon, arrêter.

## ANNEXE B

Règles de priorités populaires en ordonnancement de production

Priorité à la commande;

RAND (*Random*) : aléatoire

SPT (*Shortest Processing Time*) : dont le temps d'opération est le plus court

FCFS (*First Come, First Serve*): par ordre d'arrivée

DD (*Due Date*) : dont la date d'exigibilité est la plus rapprochée

SLACK (*Slack Time*) : délai jusqu'à la date d'exigibilité moins le temps de traitement total restant

S/RO (*Slack per Remaining Operation*) : : délai jusqu'à la date d'exigibilité moins le temps de traitement total restant, divisé par le nombre d'opérations restantes

CR (*Critical Ratio*) : ayant le ratio critique le plus faible ; le délai jusqu'à la date d'exigibilité, divisé par le temps de traitement

FOPR (*Fewest Operation Remaining*) : nécessitant le moins d'opérations pour être terminée

LWKR (*Least Work Remaining*) : nécessitant le moins de temps d'opération pour être terminée

MWKR (*Most Work Remaining*) : nécessitant le plus de temps d'opération pour être terminée

TWK (*Total Work*) : le temps d'opération total requis pour traiter la commande

NQ (*Next Queue*) : dont la file d'attente (en nombre d'ordres de fabrication) pour l'opération subséquente est la plus courte

WINQ (*Work In Next Queue*) : dont la file d'attente (en temps d'opération) pour l'opération subséquente est la plus courte

COVERT (*Cost Over Time*) : dont le ratio suivant est le plus élevé ; le coût du délai divisé par le temps requis.

## ANNEXE C

Termes relatifs au langage orienté-objet

### Termes relatifs au langage orienté-objet

**Programmation orientée objet** : Système de programmation qui permet *l'abstraction*, la programmation hiérarchique modulaire, et qui est caractérisé par les notions de *polymorphisme*, *d'héritage*, et *d'encapsulation*.

**Objet** : Une *instance* d'une *classe* qui combine données et procédures (ex : un contrôle d'un formulaire)

**Instance** : Un *objet* créé à partir d'une définition de *classe* (ex : une boîte de texte d'un formulaire est créée à partir de la définition de la *classe* "TextBox")

**Classe** : Un "modèle" qui définit les caractéristiques d'un *objet* et décrit le comportement et l'aspect de l'objet. Une **sous-classe** est une définition de *classe* qui a pour origine une autre *classe* et qui en hérite toutes les modifications ultérieures (*caractéristique d'héritage*).

**Abstraction (voir Encapsulation)** : Identification des caractéristiques distinctives d'une *classe* ou d'un *objet* sans avoir à traiter toute l'information sur cette *classe* ou cet *objet*. Par exemple, un groupe *objets* défini dans une *classe* peut être utilisé comme une entité unique sans intervenir sur les interactions entre les composants de cette entité.

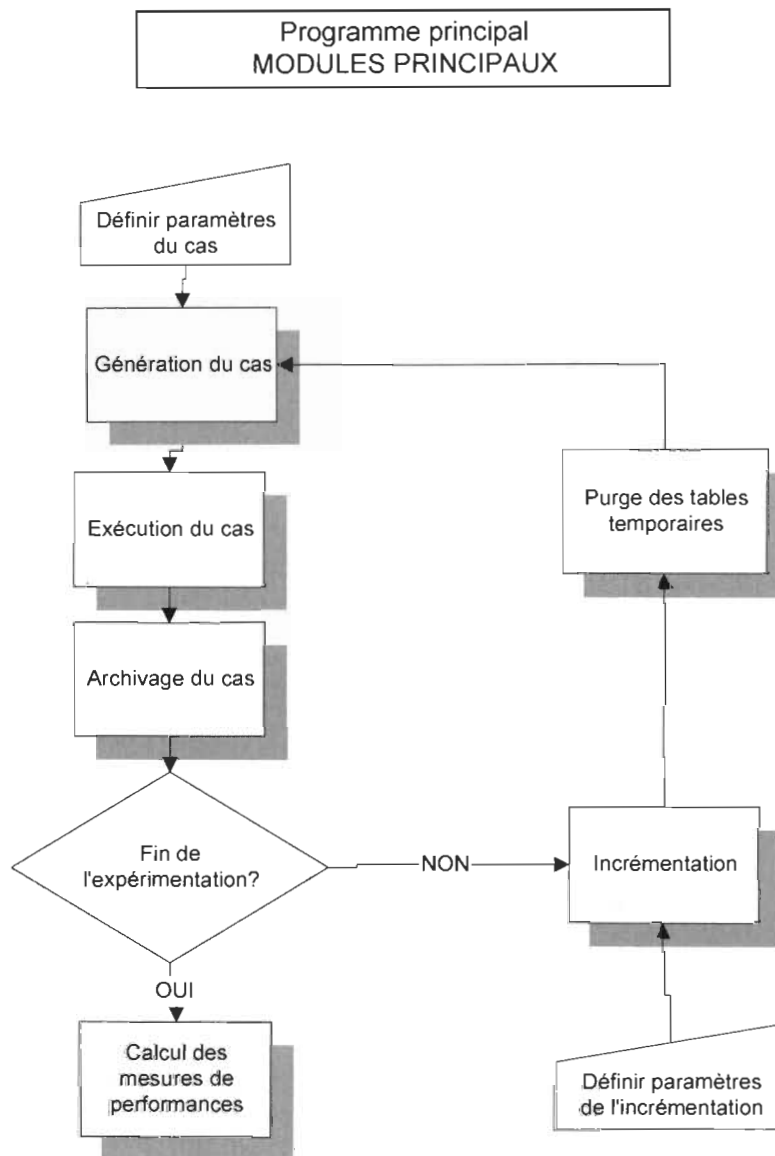
**Polymorphisme** : La capacité d'avoir des procédures du même nom mais avec des contenus différents pour des *objets* de *classes* apparentées. La procédure à utiliser est déterminée par la *classe* de l'objet.

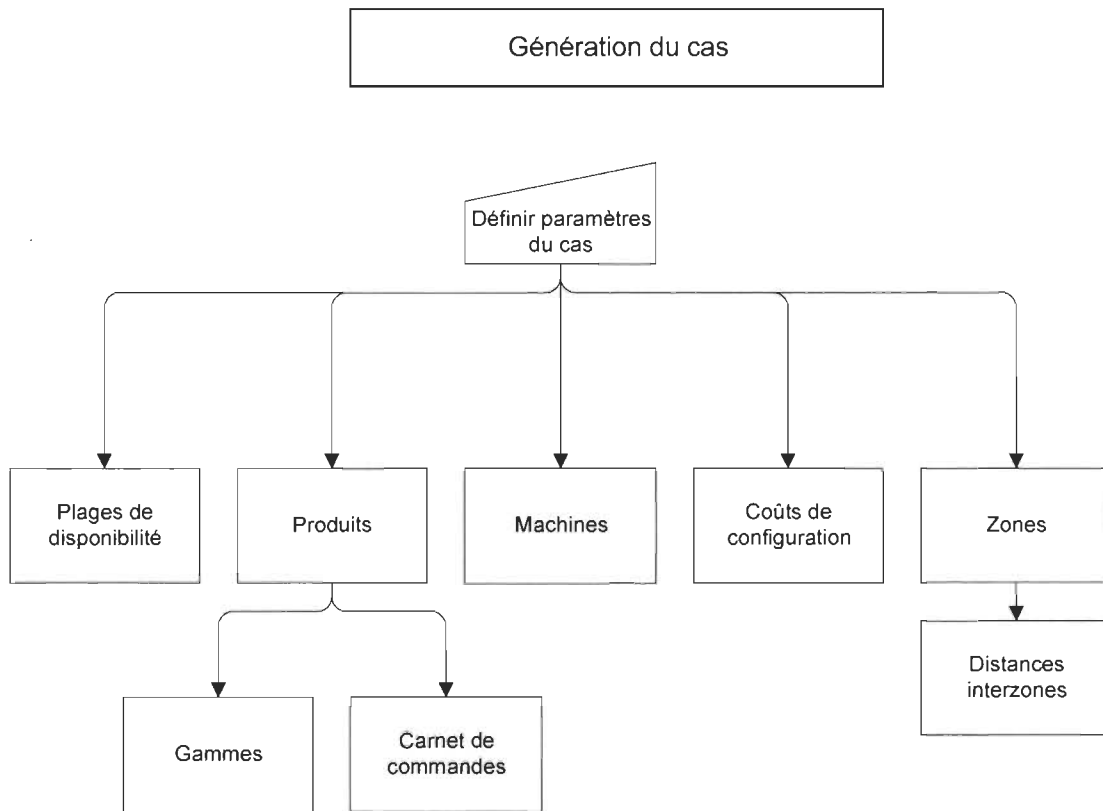
**Héritage** : La capacité d'une *sous-classe* de prendre toutes les caractéristiques de la *classe* sur laquelle elle est basée. Lorsque des modifications sont apportées aux caractéristiques de la *classe* parent, la *sous-classe* hérite automatiquement de ces changements.

**Encapsulation (voir Abstraction)** : La capacité d'isoler et "cacher" l'information relative à un objet particulier, tel que les données internes, les structures et la programmation. L'encapsulation isole la complexité interne des opérations d'un objet du reste de l'application.

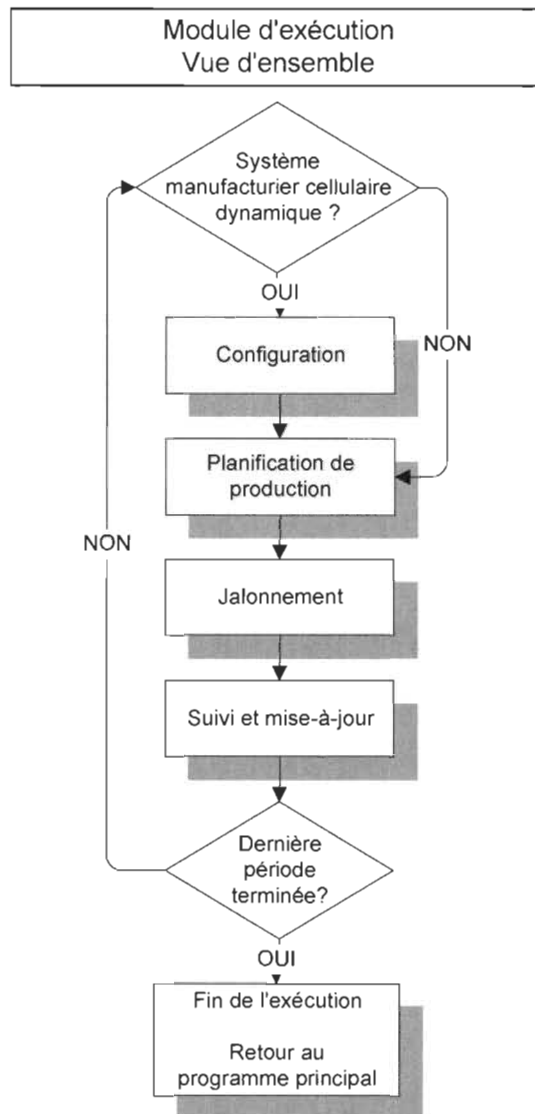
## ANNEXE D

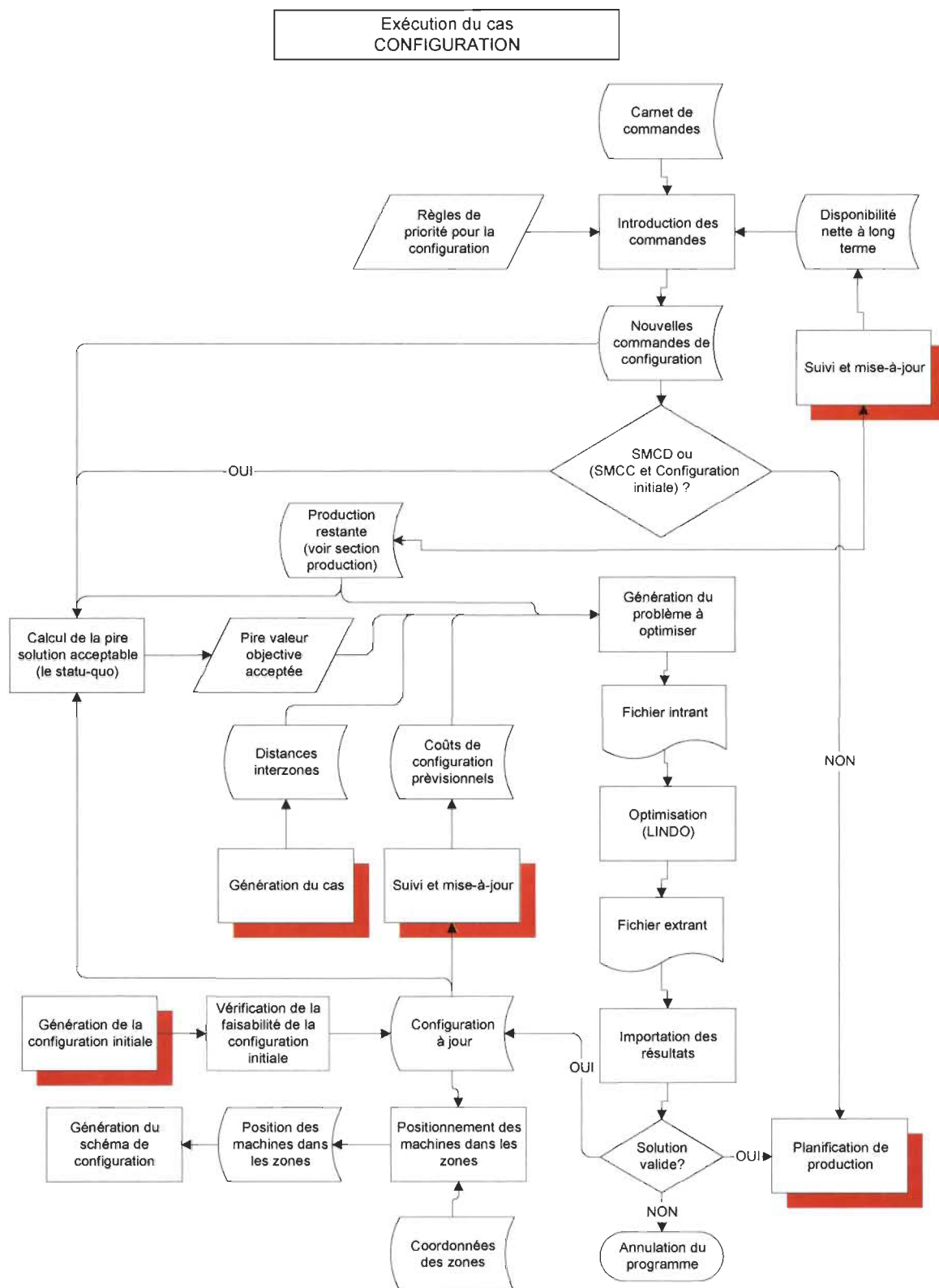
Schémas du modèle informatique

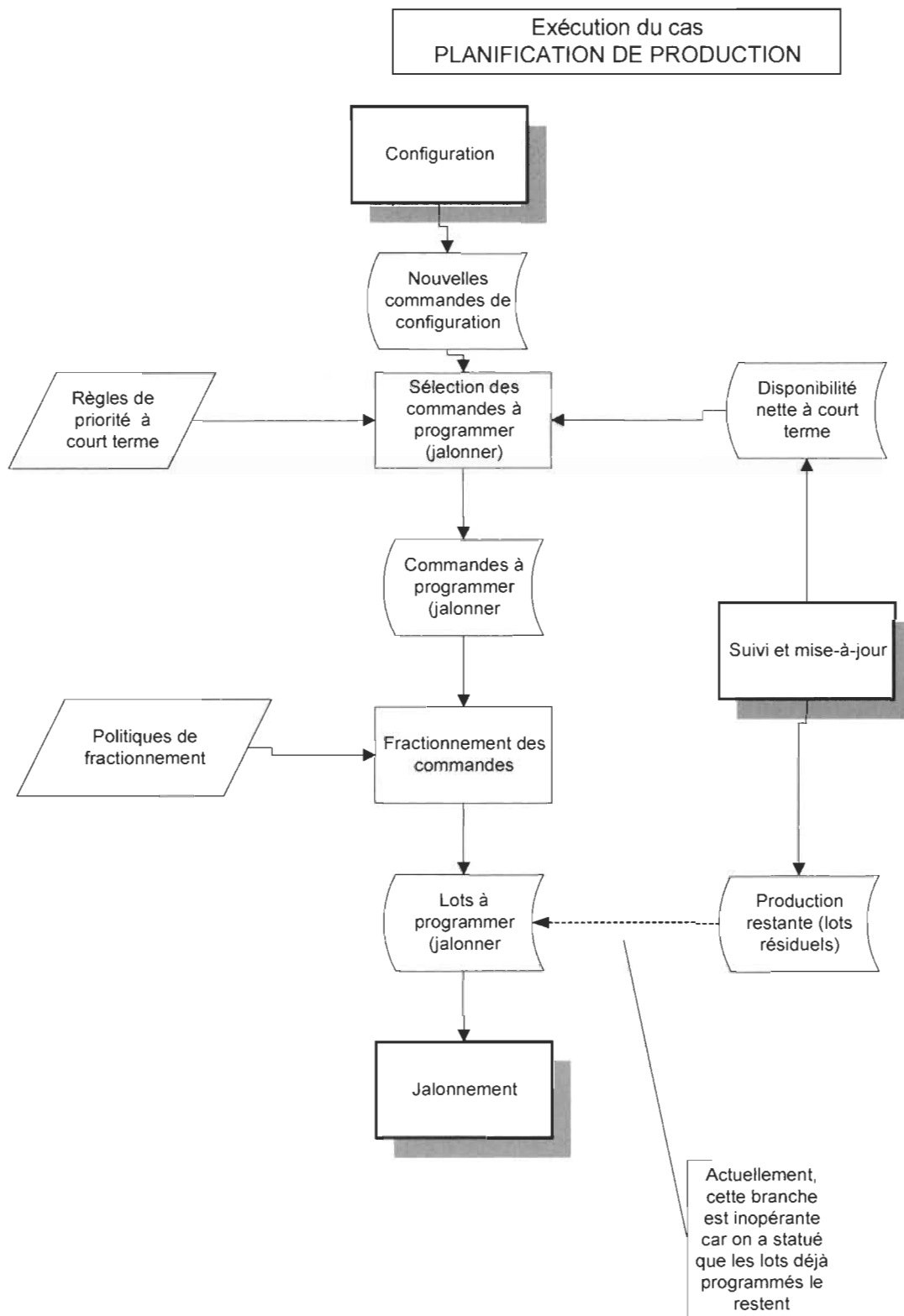


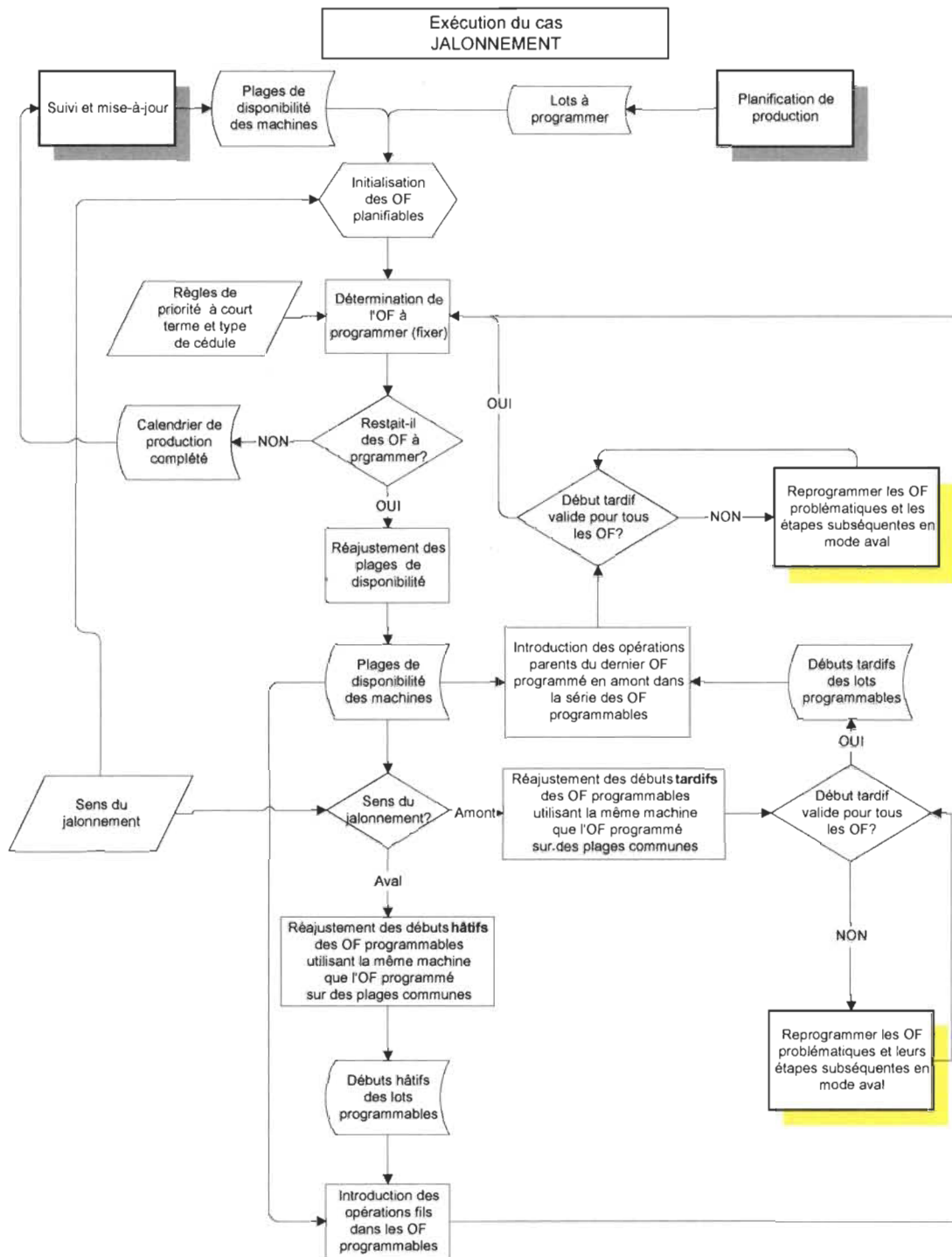


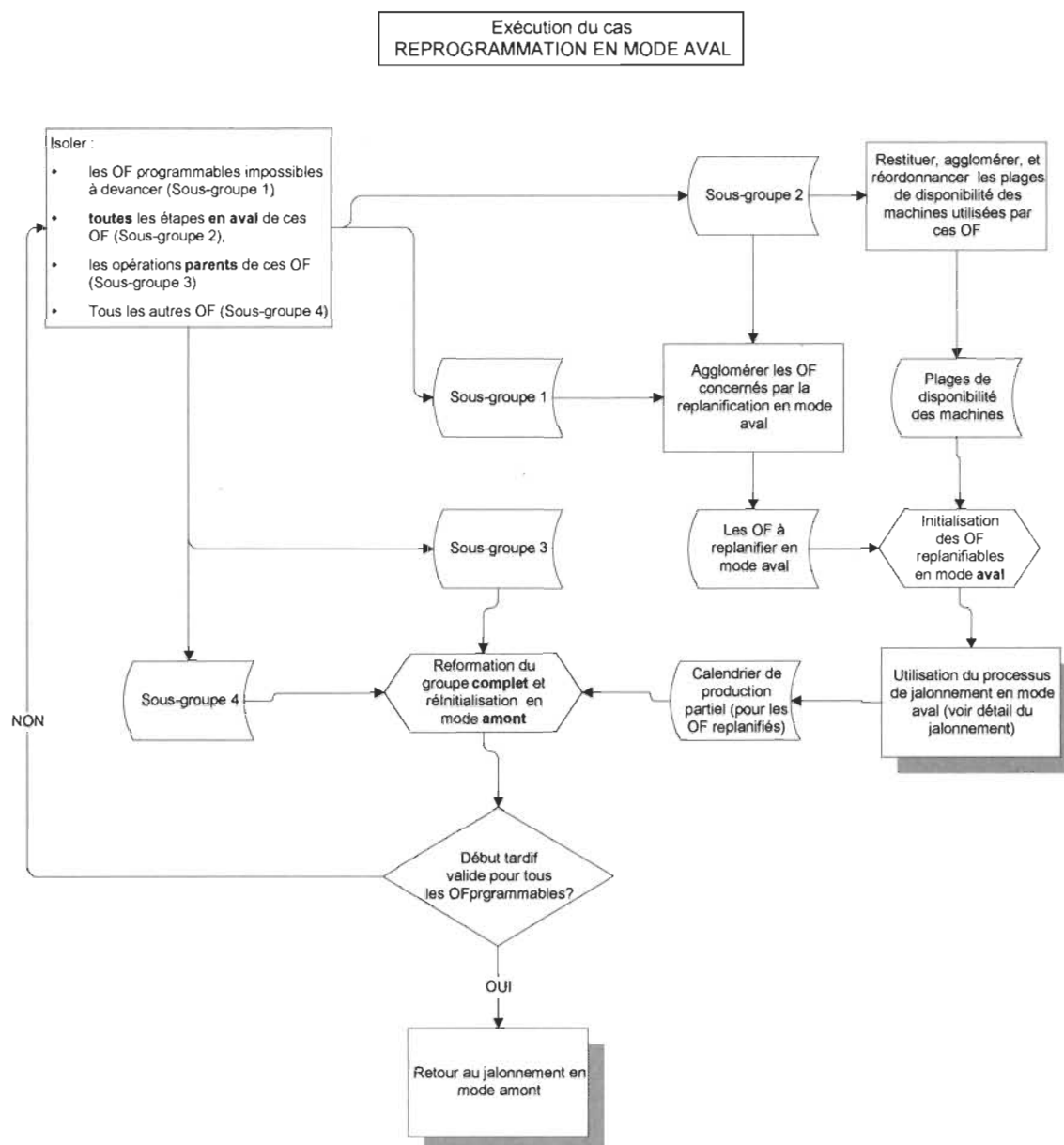




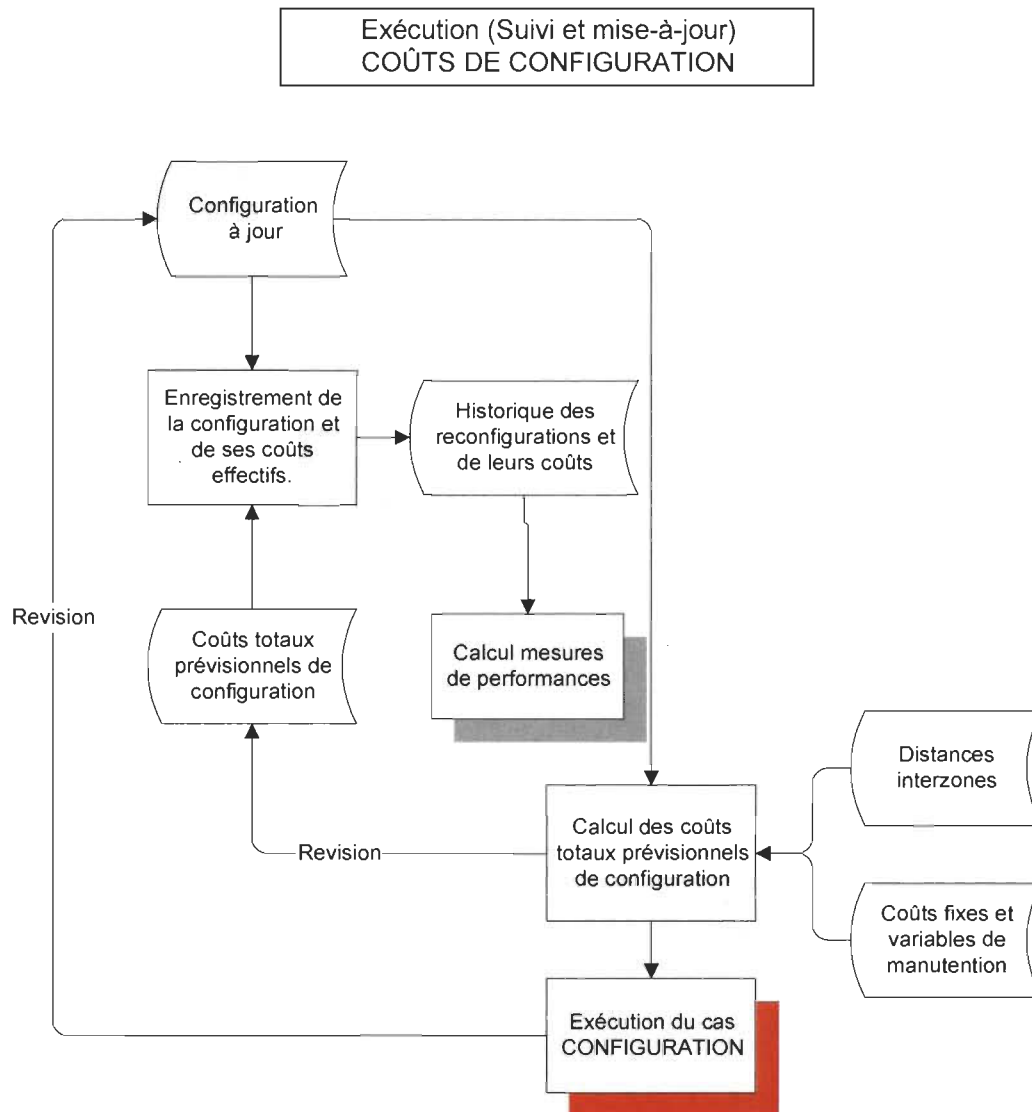




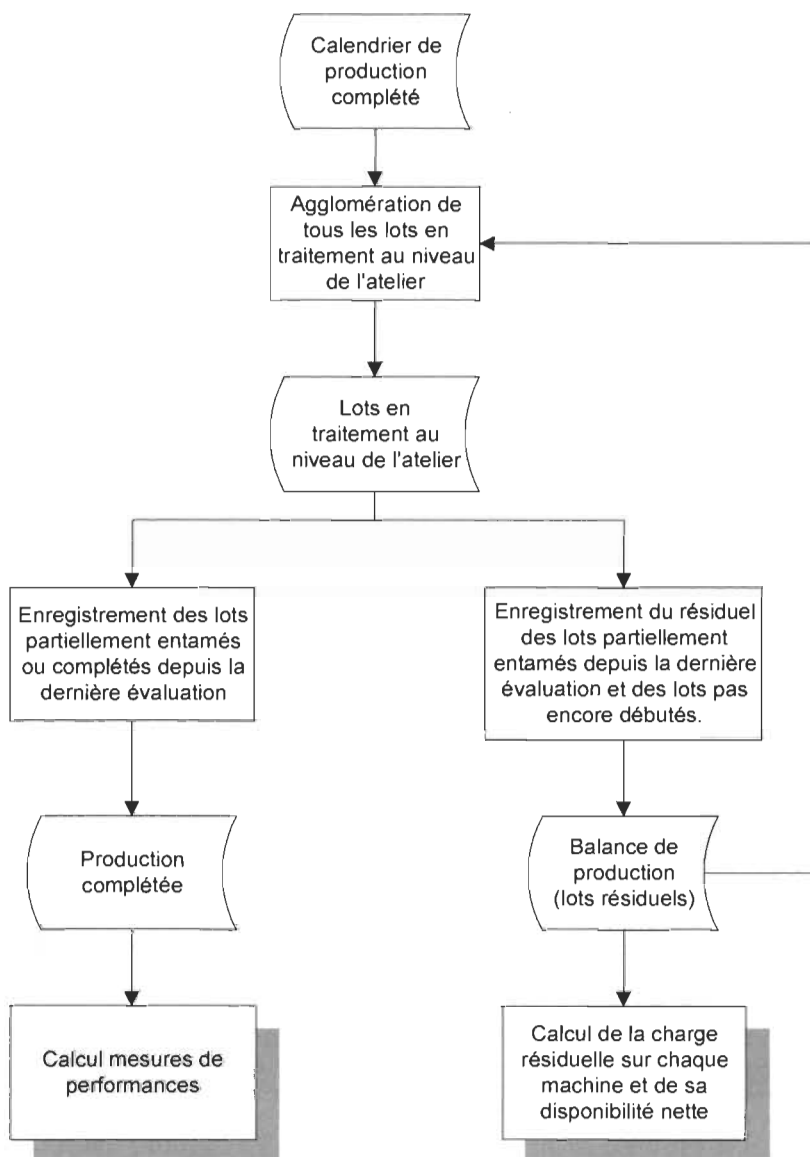




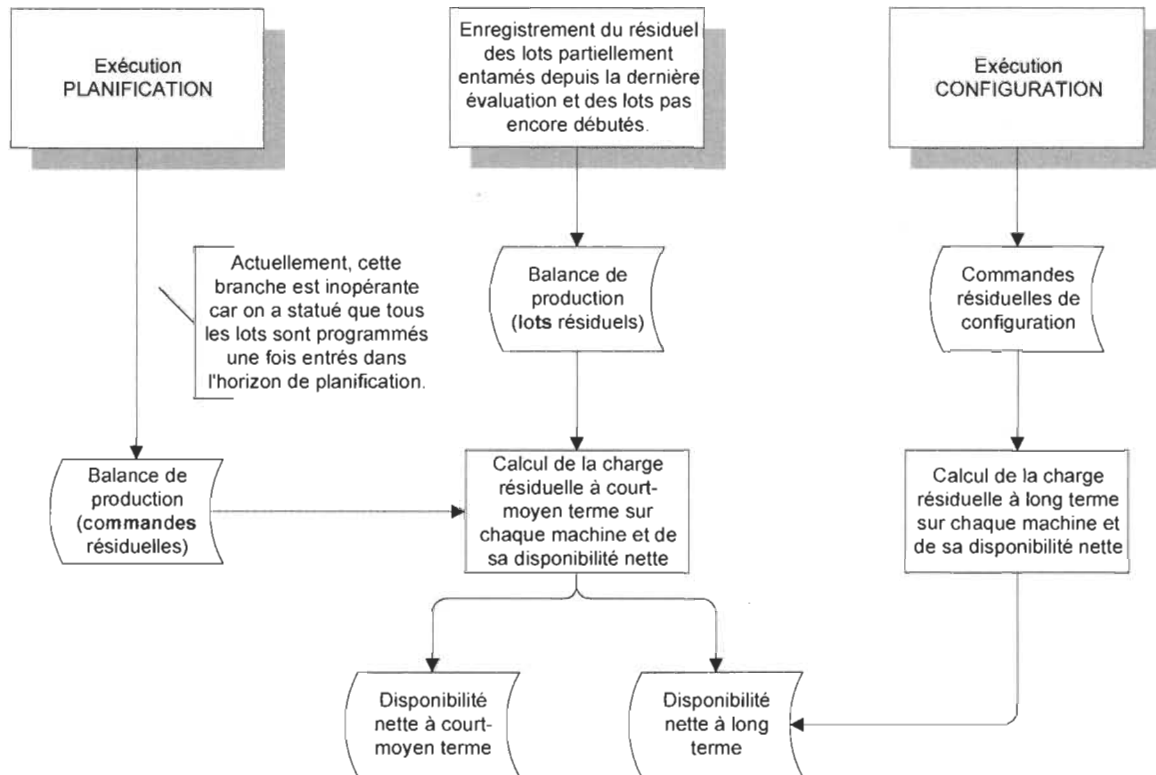
Note : Cette partie n'est utilisée qu'en jalonnement amont, lorsqu'on se rend compte qu'un ordre de fabrication aurait du débiter avant la date courante pour respecter la date exigible (date de livraison).



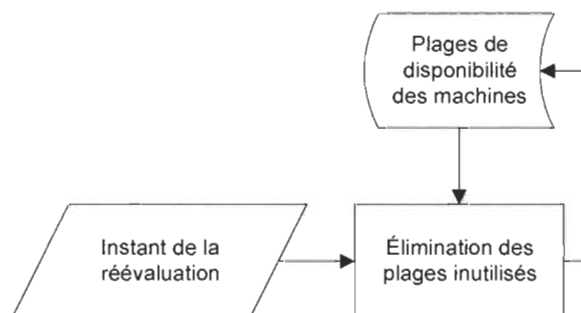
Exécution (Suivi et mise-à-jour)  
CALENDRIER DE PRODUCTION



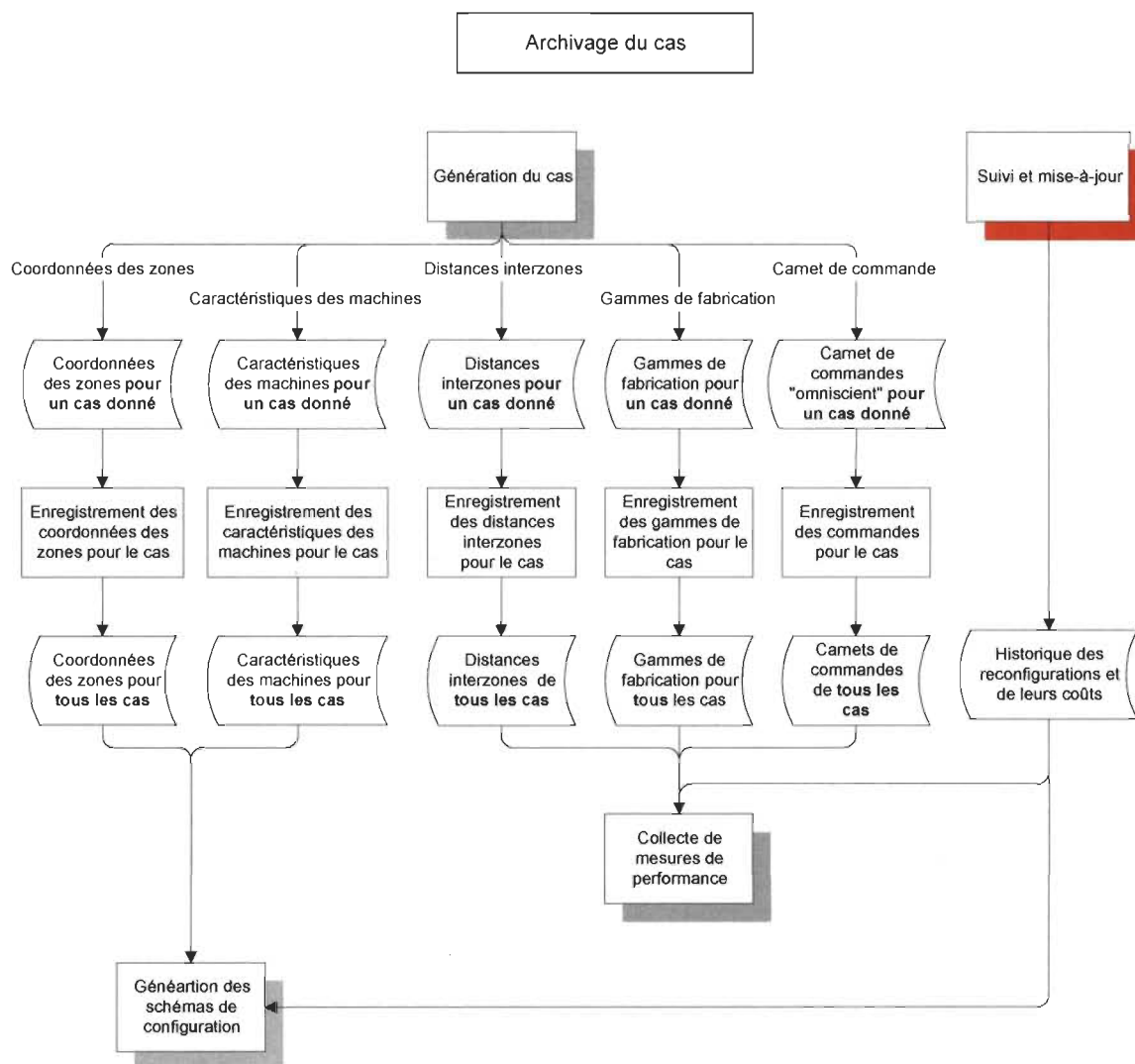
Exécution (Suivi et mise-à-jour)  
DISPONIBILITÉS DES MACHINES



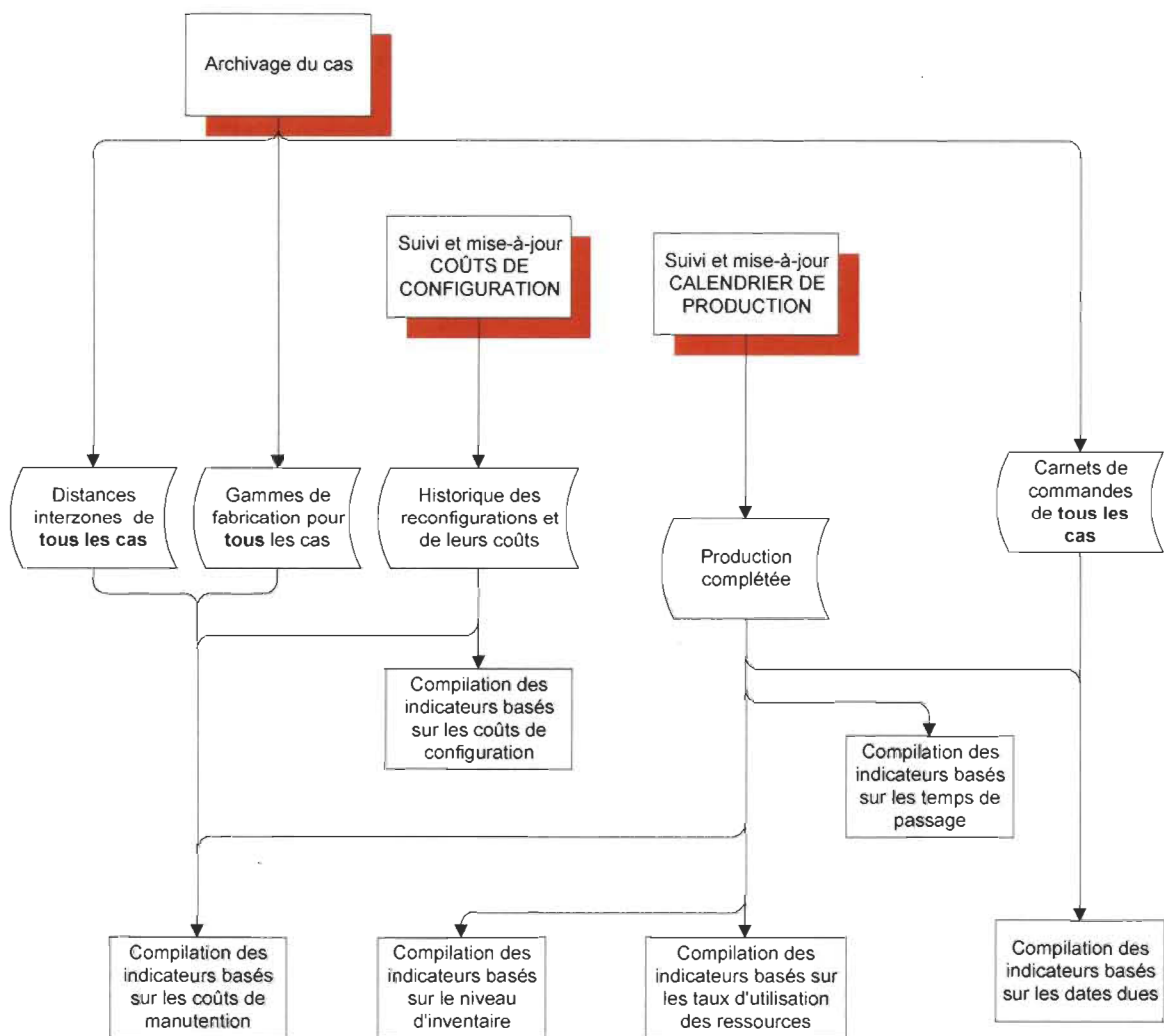
Exécution (Suivi et mise-à-jour)  
PLAGES DE DISPONIBILITÉ







Collecte de mesures  
de performance



ANNEXE E  
Formulaires de départ

**Départ**

Gestion et contrôle | Flux | Demande | Ressources | Optimisation

	Configurations	Production	
Ordre d'introduction des commandes	<input type="radio"/> PAPS	<input type="radio"/> PAPS	Heures/sem. <input type="text" value="50"/>
	<input type="radio"/> Date due	<input type="radio"/> Date due	Cédule <input checked="" type="radio"/> Non-delay <input type="radio"/> Active <input type="radio"/> Semi-active
	<input checked="" type="radio"/> Date due+SPT	<input checked="" type="radio"/> Date due+SPT	
	<input type="radio"/> Ratio critique	<input type="radio"/> Ratio critique	
		<input type="radio"/> SPT	<input type="radio"/> SPT
Horizon (sem)	<input type="text" value="8"/>	<input type="text" value="4"/>	Jalonnement <input checked="" type="radio"/> Aval (chronologique) <input type="radio"/> Amont (à rebours)
Tampon de capacité	<input type="text" value="10.0 %"/>	<input type="text" value="10.0 %"/>	
Goulots admissibles	<input type="text" value="12"/>	<input type="text" value="12"/>	
Fractionnement des commandes en lots de production	<input checked="" type="radio"/> Aucun (commande = lot de production)		
	<input type="radio"/> Lot de production = lot de transfert		
	<input type="radio"/> Facteur (1 commande = N lots de production)		
	<input type="radio"/> Lots de production = Quantité minimum du PDP		
	<input type="radio"/> Lots de production fct (Temps fabrication minimum du PDP)		

**Départ** [-] [ ] [X]

Gestion et contrôle | **Flux** | Demande | Ressources | Optimisation

Lot de transfert interzone

- ☐ Lot unitaire
- ☒ Kanban (égal à la production d'une heure)
- ☐ Charge unitaire standard fixe (quantité)
- ☐ Charge unitaire standard volumique (pi3)

Coût de manutention par lot de transfert (\$/pi. lin.)

**Départ**

Gestion et contrôle | Flux | **Demande** | Ressources | Optimisation

Nombre de produits

Caractéristiques des produits

	MIN	MAX
Taille moyenne des commandes	500	1000
Taille minimum des commandes	1	50
Durée des cycles de vie (sem)	5	20
Début des cycles de vie (sem)	0	27
Durée du plateau (sem)	0	3
Nombre de phases (M/C)	1	5
Volume d'une pièce (po3)	1	1728
Temps d'opération (min)	1	10
Préavis des commandes (sem)	5	10

**Départ** \_ □ X

---

Gestion et contrôle | 
 Flux | 
 Demande | 
 Ressources | 
 Optimisation

---

Nombre d'unités du parc-machines 12  
 Espace entre les machines (en pieds) 0.25 pi  
 Largeur minimale de l'allée (en pieds) 8.00 pi  
 Nombre de zones 4  
     ... dans la partie supérieure 2  
 Taux d'innoculation moyen espéré 20.0 %

Machines	Petites	Moyennes	Grandes
Proportion du parc-machines (%)	50 %	35 %	15 %
Largeur (en pieds)	3.5 pi	3.5 pi	7.5 pi
Longueur (en pieds)	3.5 pi	7.5 pi	7.5 pi
Coût de déplacement (\$/pi lin.)	0.01	0.05	0.10
Coût de déplacement fixe (\$)	0.00	25.00	250.00

**Départ**

Gestion et contrôle | Flux | Demande | Ressources | **Optimisation**

Nombre de répliques par expérience	2
Nombre de configurations et/ou réévaluations	30
Horizon de réévaluation (sem)	1
Bip initial (pire solution acceptable)	50000000
Numéro de cas	2
Pourcentage minimal d'amélioration accepté	5%

☒ DCMS  
☐ CCMS  
☐ AS

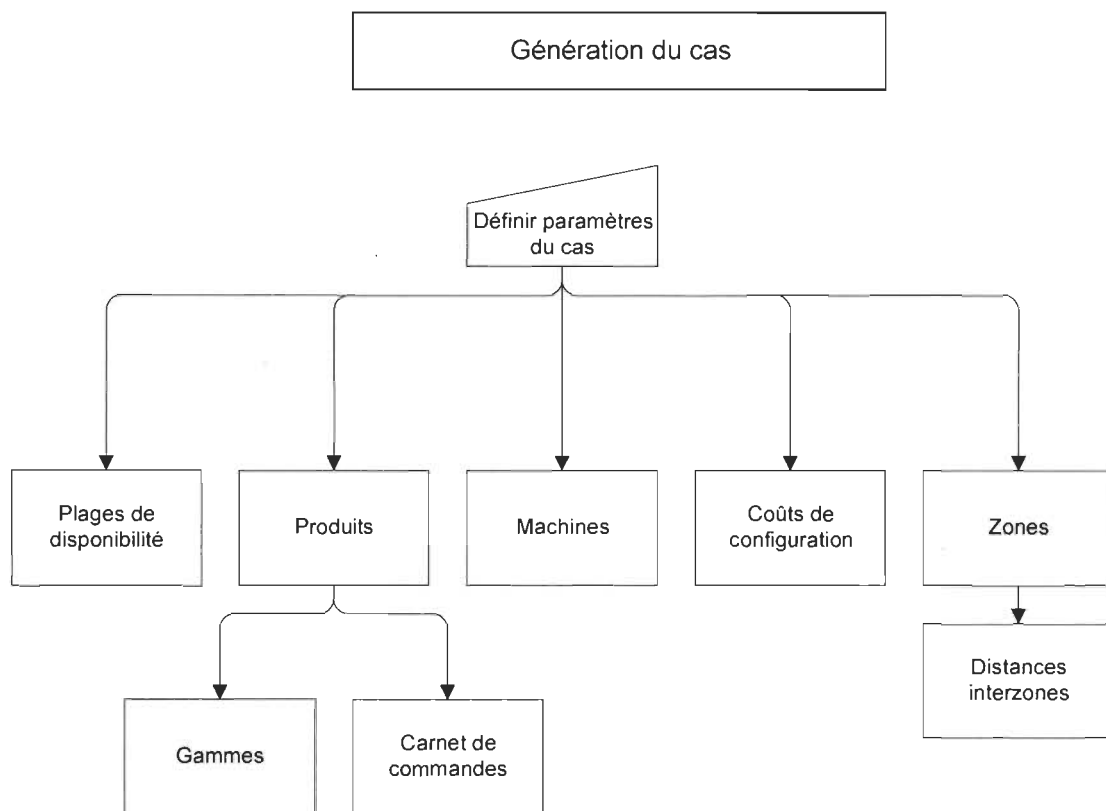
Lancer la génération  
Quitter sans générer

☒ Éliminer l'approximation des flux des balances de prod.

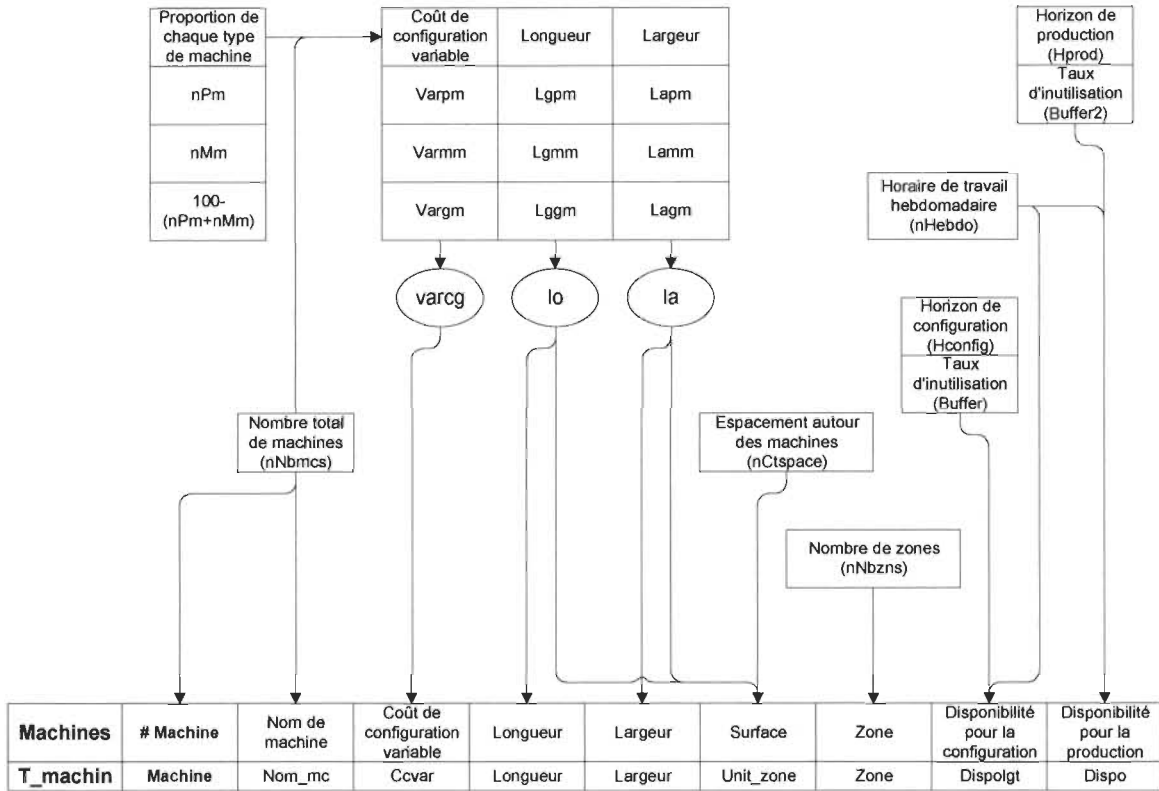


## ANNEXE F

Influence des variables de départ sur le cas généré



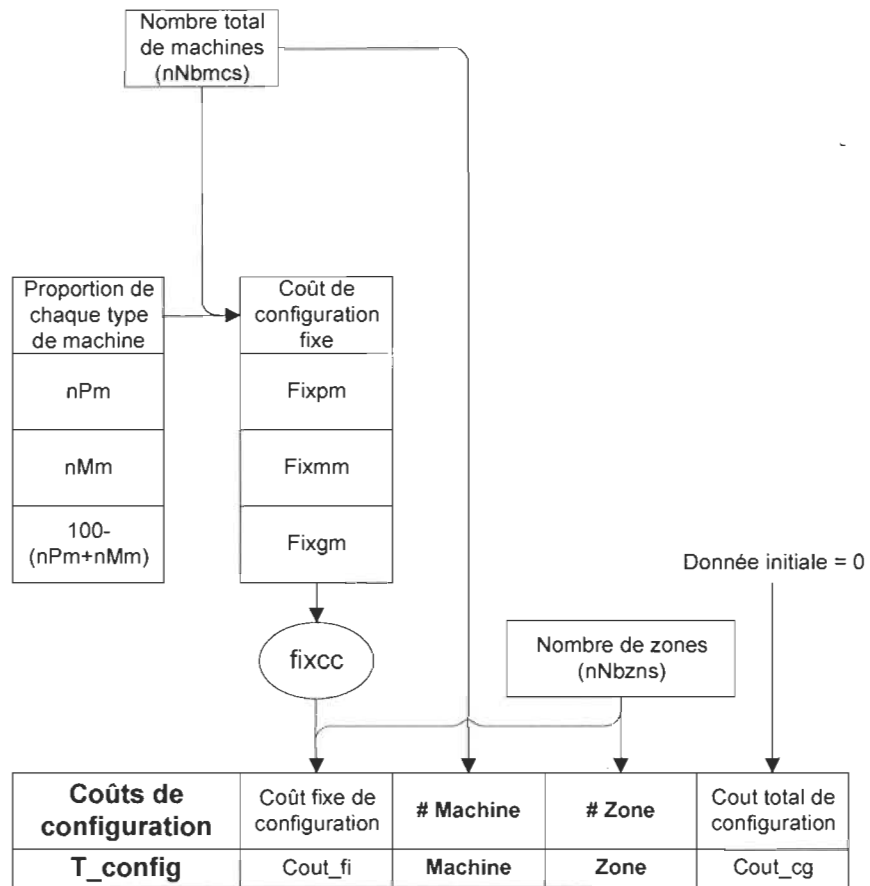
Génération du cas  
LES MACHINES



Donnée initiale par défaut

Machines	Orientation de la machine	Coordonnée horizontale	Coordonnée verticale
T_machin	Sens	X_mc	Y_mc

Génération du cas  
LES COÛTS DE CONFIGURATION



Génération du cas  
LES PLAGES DE DISPONIBILITÉ

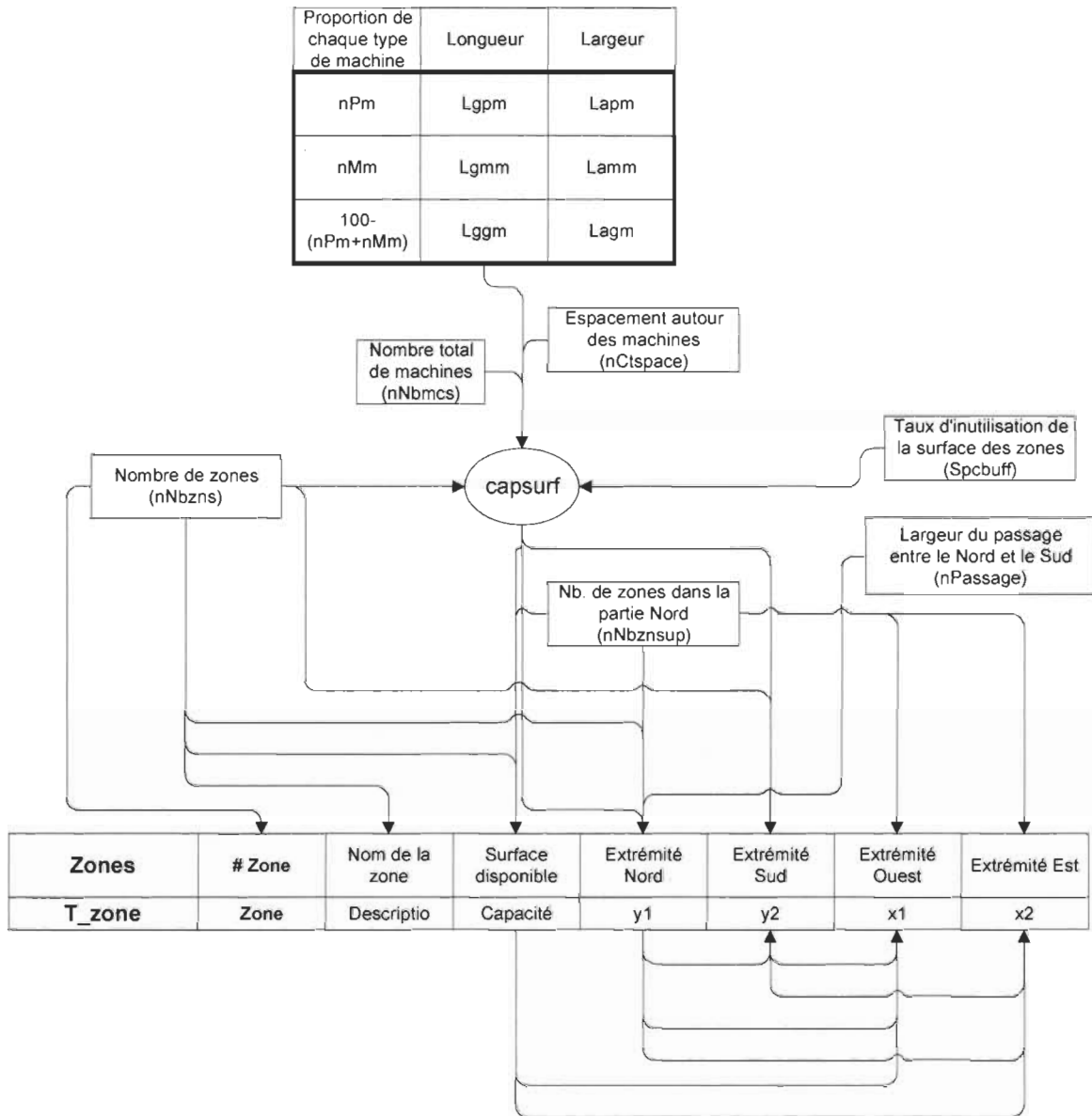
Donnée initiale = 0

Nombre total  
de machines  
(nNbmcS)

Donnée initiale = infini

Plages de disponibilité	# Machine	Disponible de ..	..À...
T_dispo	Machine	Dès	Jsq

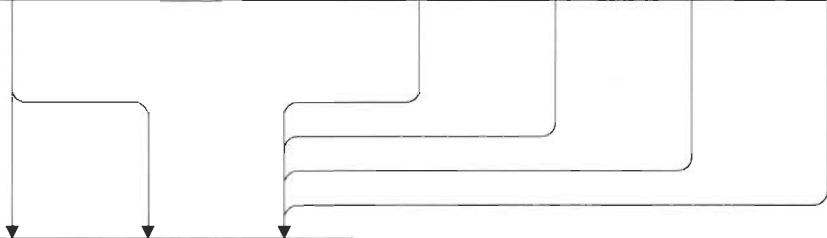
Génération du cas  
LES ZONES



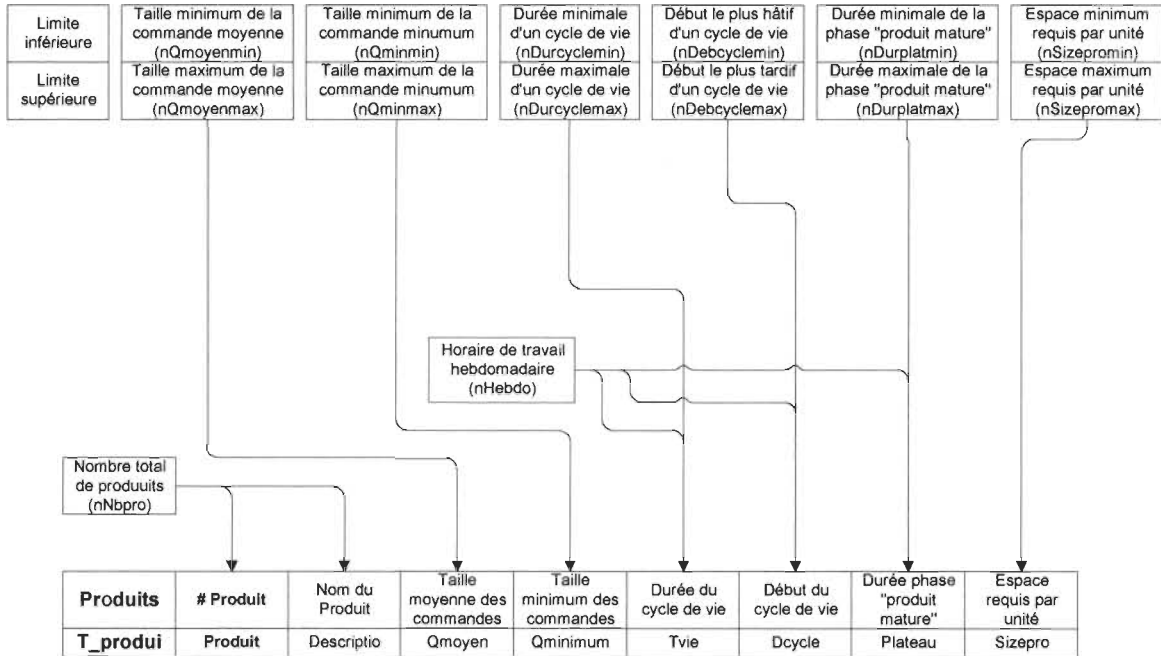
Génération du cas  
LES DISTANCES INTERZONES

Zones	# Zone	Nom de la zone	Surface disponible	Extrémité Nord	Extrémité Sud	Extrémité Ouest	Extrémité Est
T_zone	Zone	Descriptio	Capacité	y1	y2	x1	x2

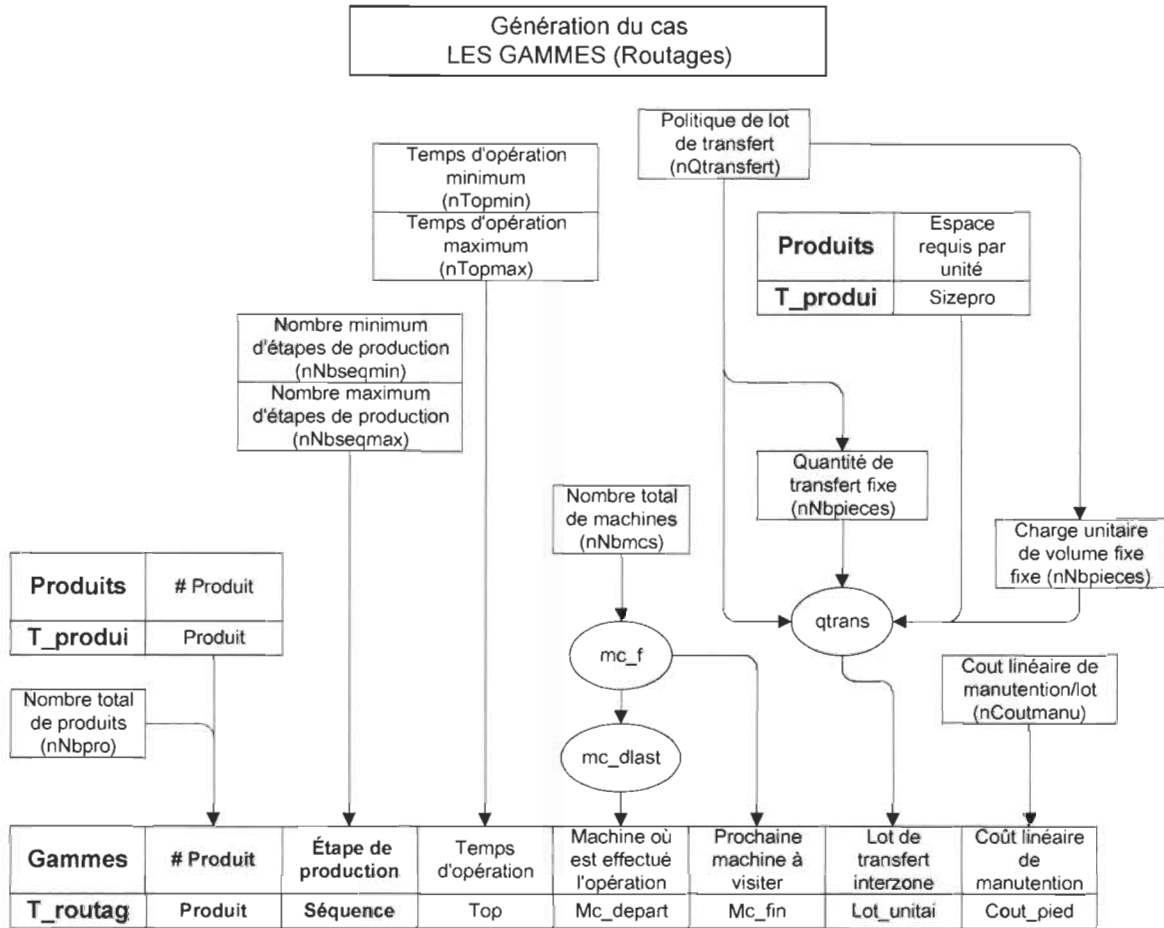
Distances interzones	# Zone de départ	# Zone d'arrivée	Distance rectilinéaire
T_distan	Zone_depar	Zone_arriv	Distance



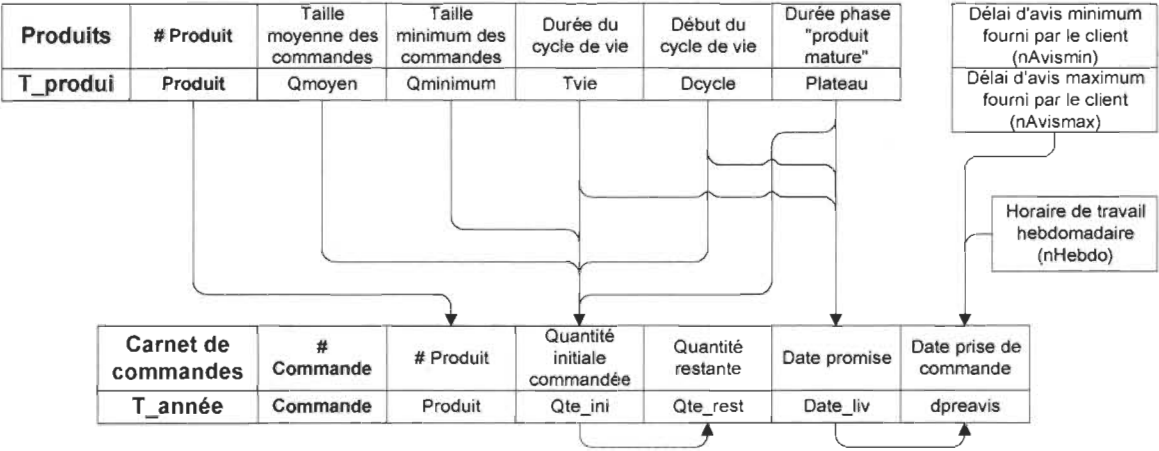
Génération du cas  
LES PRODUITS







Génération du cas  
CARNET DE COMMANDES



ANNEXE G :  
Analyse des résultats d'expérience

## Résultats d'expérience

### Temps de passage moyen pondéré

Tableau 38  
Analyse de variance du temps de passage moyen pondéré

Source	dl	SC	V	F	Fcritique	P(F)	SC'	p%
Règle (A)	3	4,1E+06	1,4E+06	5,78	2,20	99,82%	3,4E+06	4,30%
Système (B)	2	7,9E+06	3,9E+06	16,82	2,42	100,00%	7,4E+06	9,48%
Calendrier (C)	1	9,4E+05	9,4E+05	4,02	2,81	94,95%	7,1E+05	0,91%
Hor.config. (D)	1	2,9E+07	2,9E+07	123,44	2,81	100,00%	2,9E+07	36,67%
Lot transfert (E)	1	5,1E+03	5,1E+03	0,02	2,81	11,64%	Rt. à l'erreur	
Nb. produits (F)	3	1,2E+06	4,0E+05	1,71	2,20	82,27%	Rt. à l'erreur	
Coût manutention (G)	1	5,1E+06	5,1E+06	21,78	2,81	100,00%	4,9E+06	6,22%
Taille commandes (H1)	1	1,1E+07	1,1E+07	46,83	2,81	100,00%	1,1E+07	13,73%
Étendue taille comm. (H2)	1	4,6E+04	4,6E+04	0,20	2,81	33,99%	Rt. à l'erreur	
Cycle de vie (I1)	1	6,5E+06	6,5E+06	27,87	2,81	100,00%	6,3E+06	8,05%
Étendue cycles (I2)	1	5,2E+05	5,2E+05	2,22	2,81	85,75%	Rt. à l'erreur	
Préavis (J1)	1	2,5E+06	2,5E+06	10,91	2,81	99,82%	2,3E+06	2,97%
Étendue préavis (J2)	1	2,7E+05	2,7E+05	1,17	2,81	71,46%	Rt. à l'erreur	
Erreur	48	1,1E+07	2,3E+05				1,4E+07	17,67%
Totale	59	7,8E+07					7,8E+07	100%

Explication des abréviations ci-haut :

Source : Le facteur (variable indépendante)

dl : Nombre de degrés de liberté

SC : Somme des Carrés :  $\frac{(T \text{ niveau } 1)^2}{N \text{ niveau } 1} + \frac{(T \text{ niveau } 2)^2}{N \text{ niveau } 2} - \frac{(T)^2}{N}$

où T est une somme de données et N un nombre de données

V : Variance, donné par SC/dl

F : Valeur de F pour le facteur :  $V_{\text{facteur}}/V_{\text{résiduelle}}$

Fcritique : Valeur de F minimale pour que le facteur soit significatif (avec seuil de confiance à 90%). Les paramètres utilisés sont alpha : 10%,  $dl_{\text{Facteur}}$ ,  $dl_{\text{résiduelle}}$ .

P(F) : Probabilité de ne pas se tromper en affirmant que le facteur apporte un apport significatif au modèle. La valeur P(F) est donnée par la table de Fisher-Snedecor correspondante

SC' : Somme des Carrés absolue, :  $SC'_{\text{Facteur}} = SC_{\text{Facteur}} - dl_{\text{Facteur}} \times V_{\text{résiduelle}}$

p% : Pourcentage de contribution à l'explication de la variable réponse  $p\% = SC'_{\text{Facteur}}/SC_{\text{Totale}}$

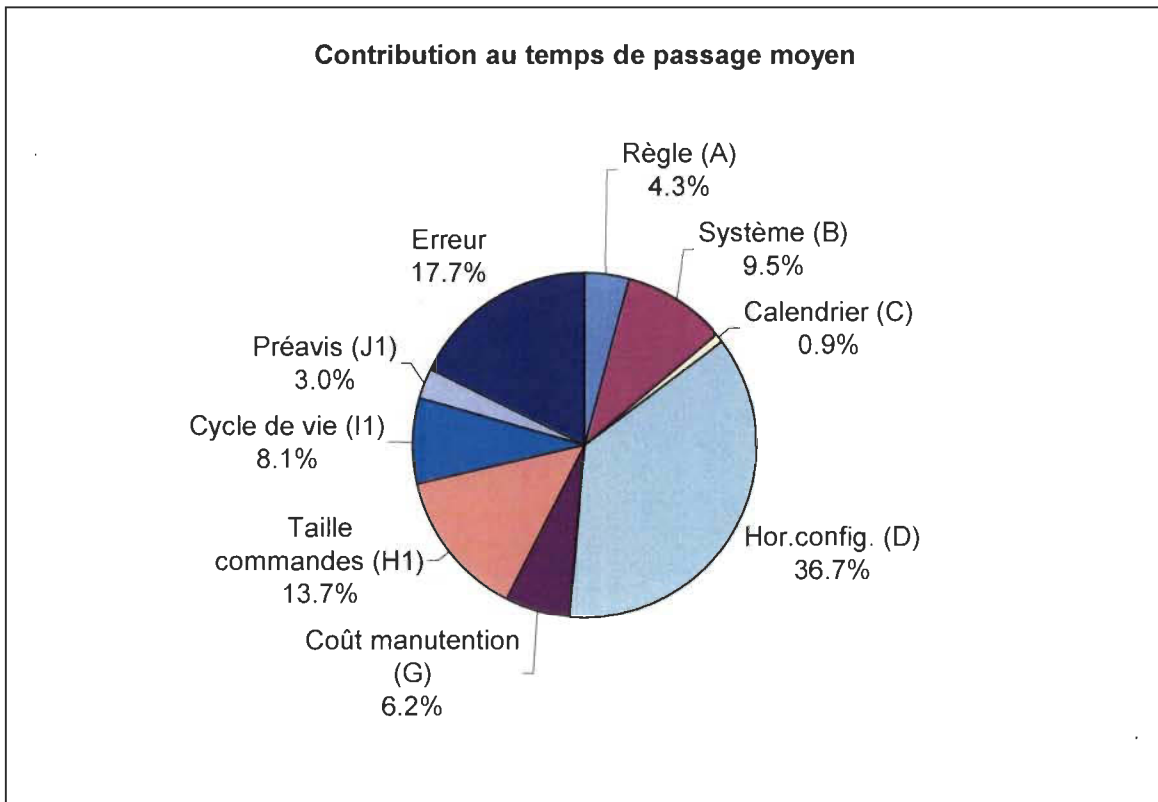


Figure 20. Contribution au temps de passage moyen

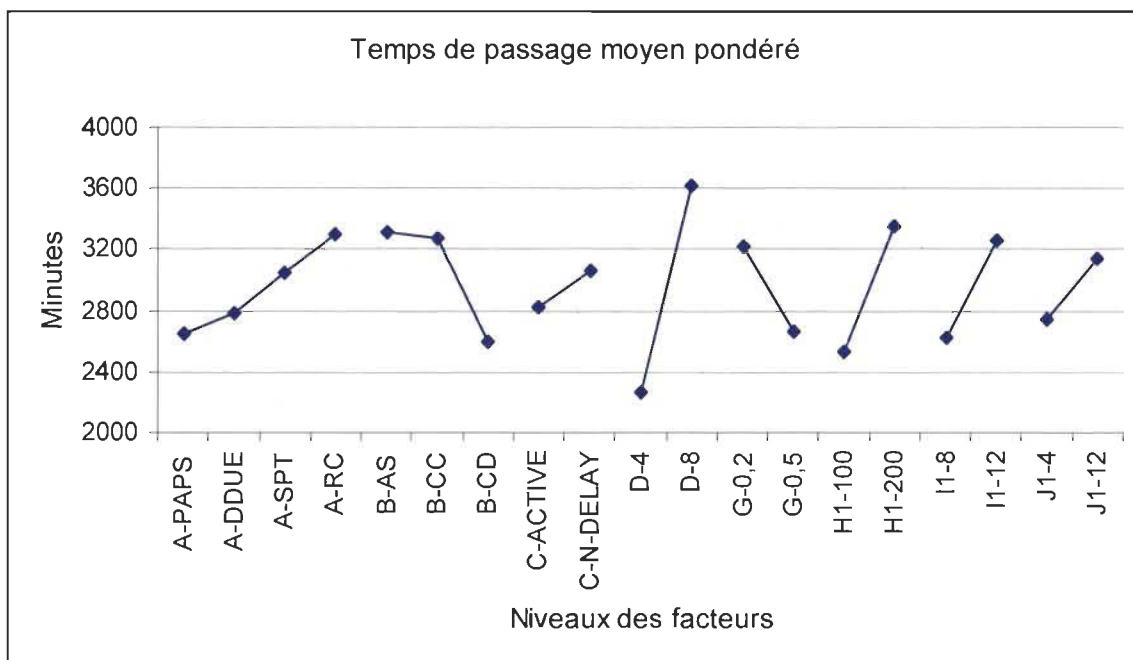


Figure 21. Effets significatifs sur le temps de passage moyen pondéré

## Écart-type pondéré du temps de passage

Tableau 39  
Analyse de variance de l'écart-type pondéré du temps de passage

Source	dl	SC	V	F	Fcrit.	P(F)	SC'	p%
Règle (A)	3	74,81	24,94	8,15	2,21	99,98%	65,63	5,11%
Système (B)	2	90,28	45,14	14,75	2,43	100,00%	84,16	6,55%
Calendrier (C)	1	27,56	27,56	9,01	2,82	99,96%	24,50	1,91%
Hor.config. (D)	1	715,56	715,56	233,82	2,82	100,00%	712,50	55,47%
Lot transfert (E)	1	1,00	1,00	0,33	2,82	42,95%	Rt. à l'erreur	
Nb. produits (F)	3	102,56	34,19	11,17	2,21	100,00%	93,38	7,27%
Coût manutention (G)	1	18,06	18,06	5,90	2,82	98,07%	15,00	1,17%
Taille commandes (H1)	1	0,00	0,00	0,00	2,82	0,00%	Rt. à l'erreur	
Étendue taille comm. (H2)	1	6,25	6,25	2,04	2,82	84,00%	Rt. à l'erreur	
Cycle de vie (I1)	1	10,56	10,56	3,45	2,82	93,01%	7,50	0,58%
Étendue cycles (I2)	1	22,56	22,56	7,37	2,82	99,06%	19,50	1,52%
Préavis (J1)	1	45,56	45,56	14,89	2,82	99,96%	42,50	3,31%
Étendue préavis (J2)	1	42,25	42,25	13,81	2,82	99,94%	39,19	3,05%
Erreur	44	134,66	3,06				180,56	14,06%
Totale	59	1 284,4					1 284,4	100%

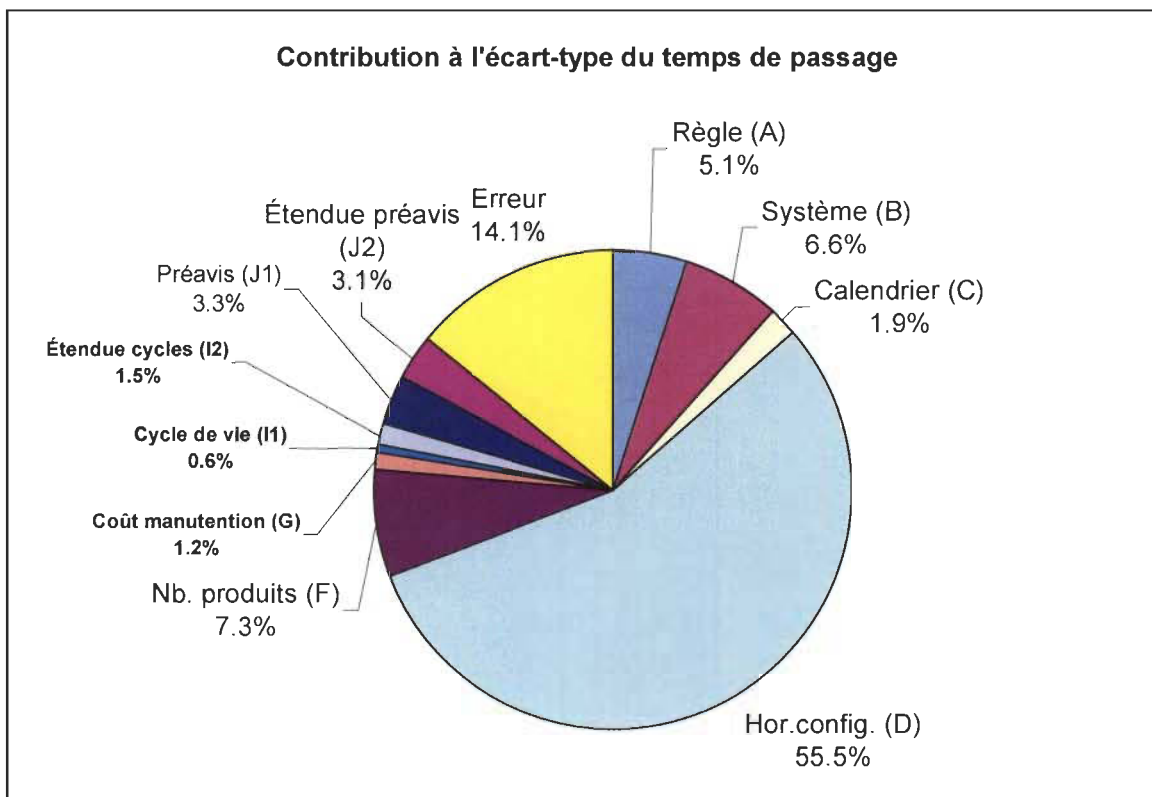


Figure 22. Contribution à l'écart-type pondéré du temps de passage

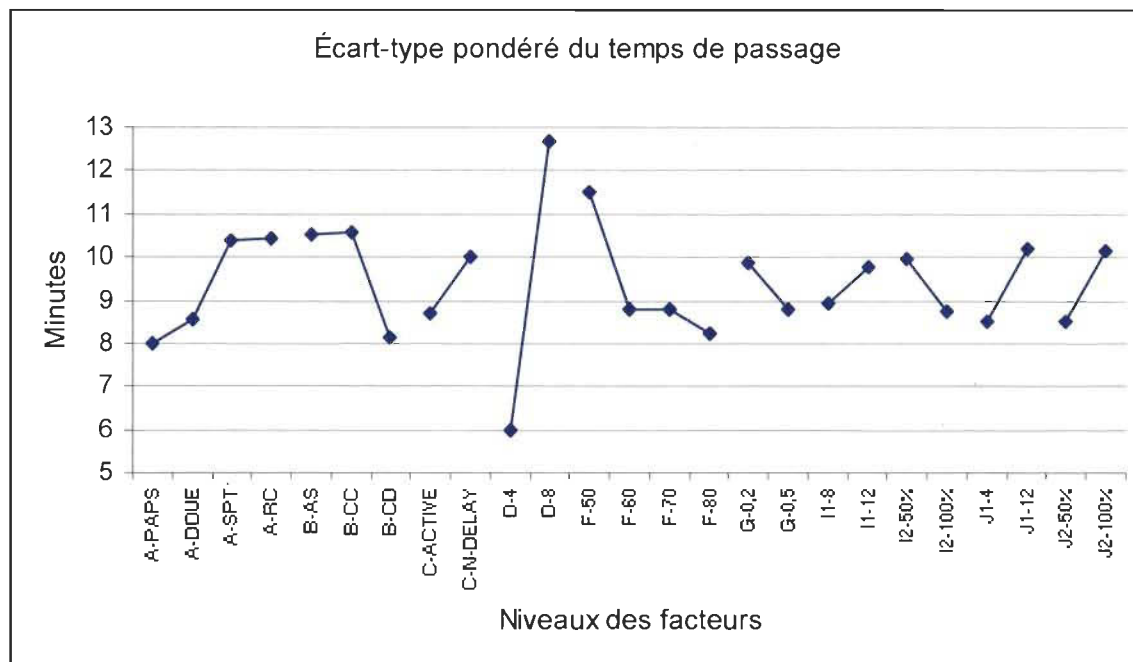


Figure 23. Effets significatifs sur l'écart-type du temps de passage

### Temps de passage maximal

Tableau 40  
Analyse de variance du temps de passage maximal

Source	dl	SC	V	F	Fcrit.	P(F)	SC'	p%
Règle (A)	3	1,4E+07	4,7E+06	3,65	2,20	98,10%	1,0E+07	2,16%
Système (B)	2	5,7E+07	2,9E+07	22,49	2,42	100,00%	5,5E+07	11,72%
Calendrier (C)	1	2,4E+06	2,4E+06	1,88	2,81	82,31%	Rt. à l'erreur	
Hor.config. (D)	1	2,5E+08	2,5E+08	193,44	2,81	100,00%	2,5E+08	52,45%
Lot transfert (E)	1	1,6E+05	1,6E+05	0,13	2,81	27,56%	Rt. à l'erreur	
Nb. produits (F)	3	4,1E+06	1,4E+06	1,06	2,20	62,44%	Rt. à l'erreur	
Coût manutention (G)	1	1,8E+07	1,8E+07	13,90	2,81	99,95%	1,6E+07	3,51%
Taille commandes (H1)	1	2,3E+07	2,3E+07	18,33	2,81	99,99%	2,2E+07	4,72%
Étendue taille comm. (H2)	1	2,2E+06	2,2E+06	1,70	2,81	80,17%	Rt. à l'erreur	
Cycle de vie (I1)	1	2,3E+07	2,3E+07	18,00	2,81	99,99%	2,2E+07	4,63%
Étendue cycles (I2)	1	1,9E+06	1,9E+06	1,47	2,81	76,94%	Rt. à l'erreur	
Préavis (J1)	1	1,6E+07	1,6E+07	12,46	2,81	99,91%	1,5E+07	3,12%
Étendue préavis (J2)	1	8,8E+06	8,8E+06	6,88	2,81	98,84%	7,5E+06	1,60%
Erreur	48	6,1E+07	1,3E+06				7,5E+07	16,08%
Totale	59	4,7E+08					4,7E+08	100%

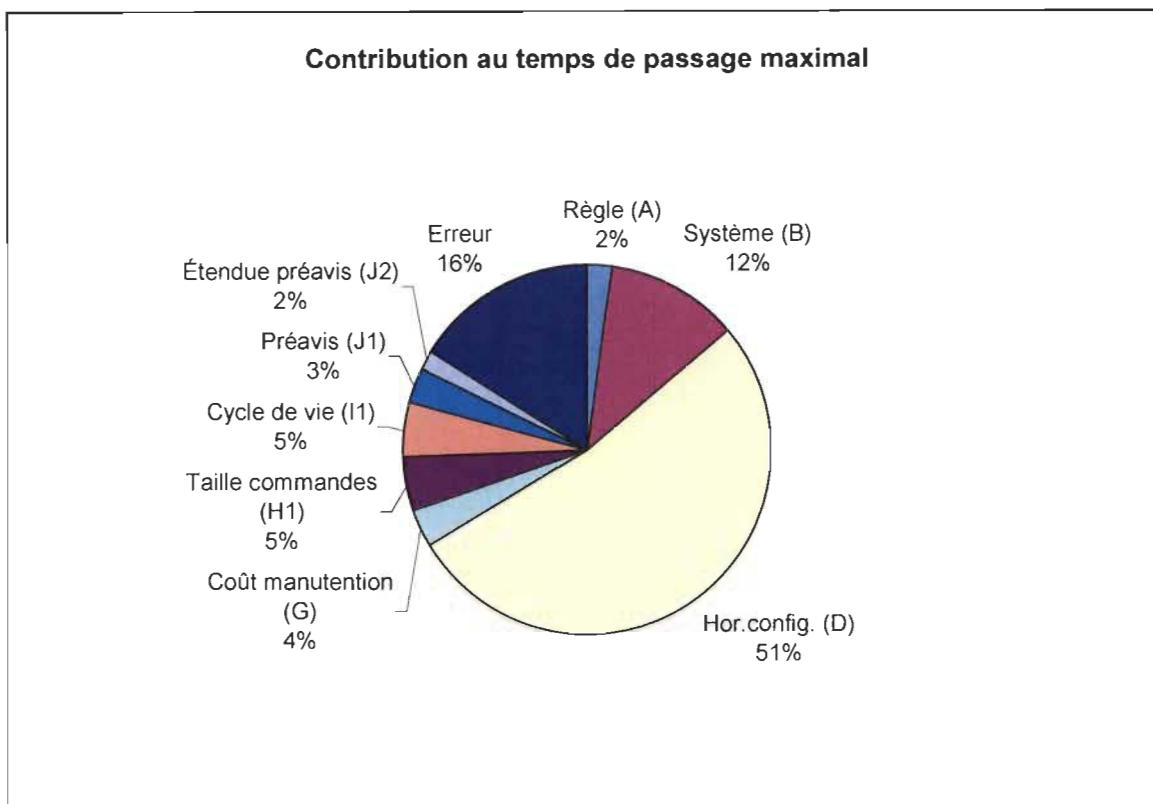


Figure 24. Contribution au temps de passage maximal

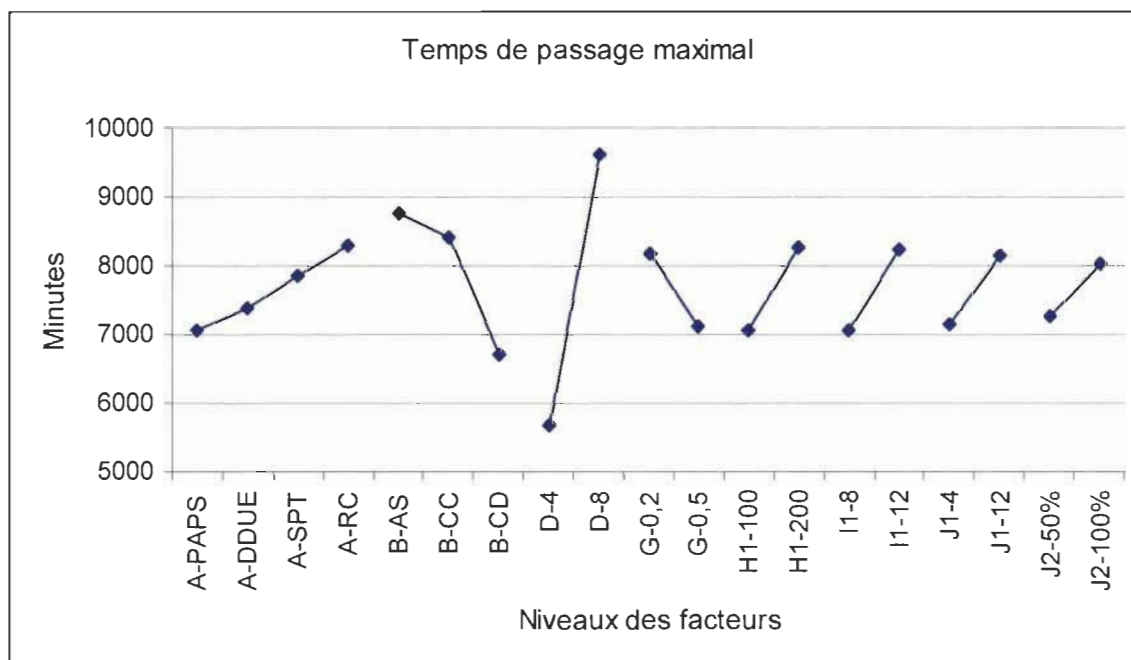


Figure 25. Effets significatifs sur le temps de passage maximal



## Taux d'utilisation moyen

Tableau 41  
Analyse de variance du taux d'utilisation moyen

Source	dl	SC	V	F	Fcrit.	P(F)	SC'	p%
Règle (A)	3	12,13	4,04	0,23	2,19	12,79%	Rt. à l'erreur	
Système (B)	2	33,84	16,92	0,98	2,41	61,81%	Rt. à l'erreur	
Calendrier (C)	1	18,06	18,06	1,05	2,81	68,90%	Rt. à l'erreur	
Hor.config. (D)	1	16,00	16,00	0,93	2,81	66,00%	Rt. à l'erreur	
Lot transfert (E)	1	9,00	9,00	0,52	2,81	52,66%	Rt. à l'erreur	
Nb. produits (F)	3	3 002,13	1 000,71	58,01	2,19	100,00%	2950,38	30,32%
Coût manutention (G)	1	95,06	95,06	5,51	2,81	97,72%	77,81	0,80%
Taille commandes (H1)	1	3 025,00	3 025,00	175,36	2,81	100,00%	3007,75	30,91%
Étendue taille comm. (H2)	1	18,06	18,06	1,05	2,81	68,90%	Rt. à l'erreur	
Cycle de vie (I1)	1	2 232,56	2 232,56	129,42	2,81	100,00%	2215,31	22,76%
Étendue cycles (I2)	1	56,25	56,25	3,26	2,81	92,31%	39,00	0,40%
Préavis (J1)	1	441,00	441,00	25,57	2,81	100,00%	423,75	4,35%
Étendue préavis (J2)	1	7,56	7,56	0,44	2,81	48,91%	Rt. à l'erreur	
Erreur	51	879,75	17,25				1017,75	10,46%
Totale	59	9 731,75					9 731,75	100%

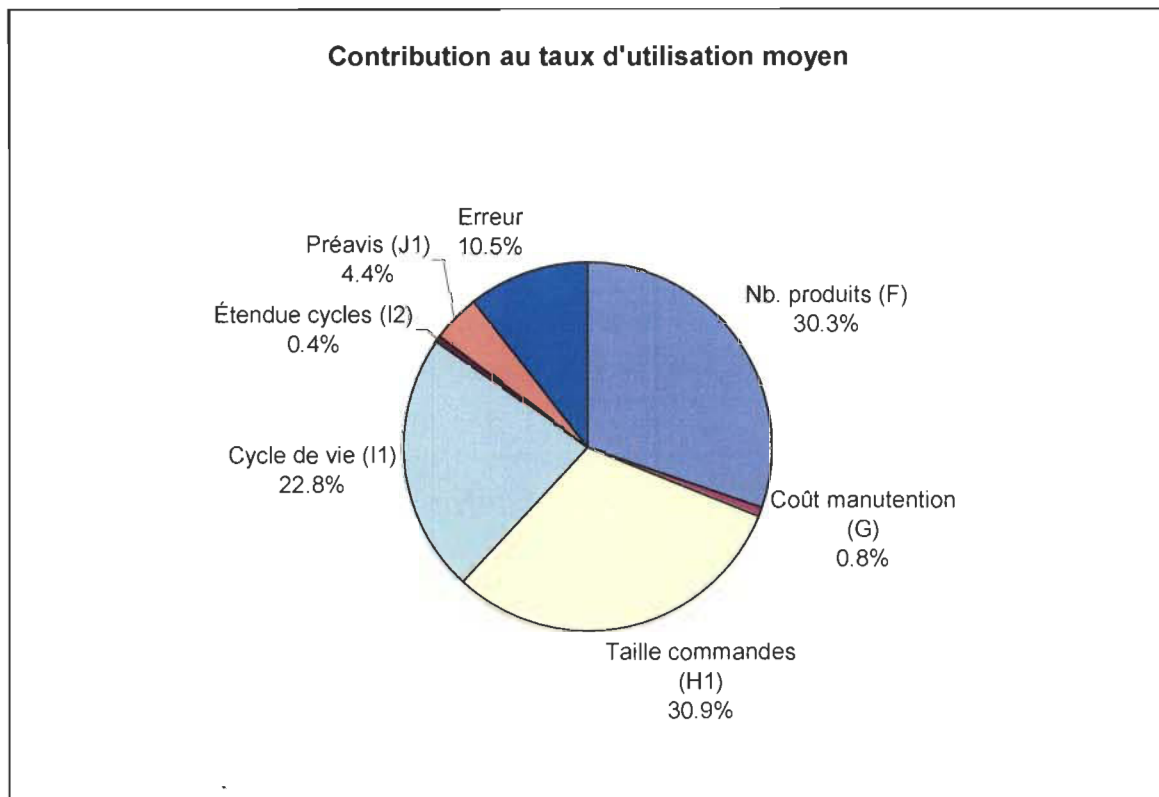


Figure 26. Contribution à la variabilité du taux d'utilisation moyen

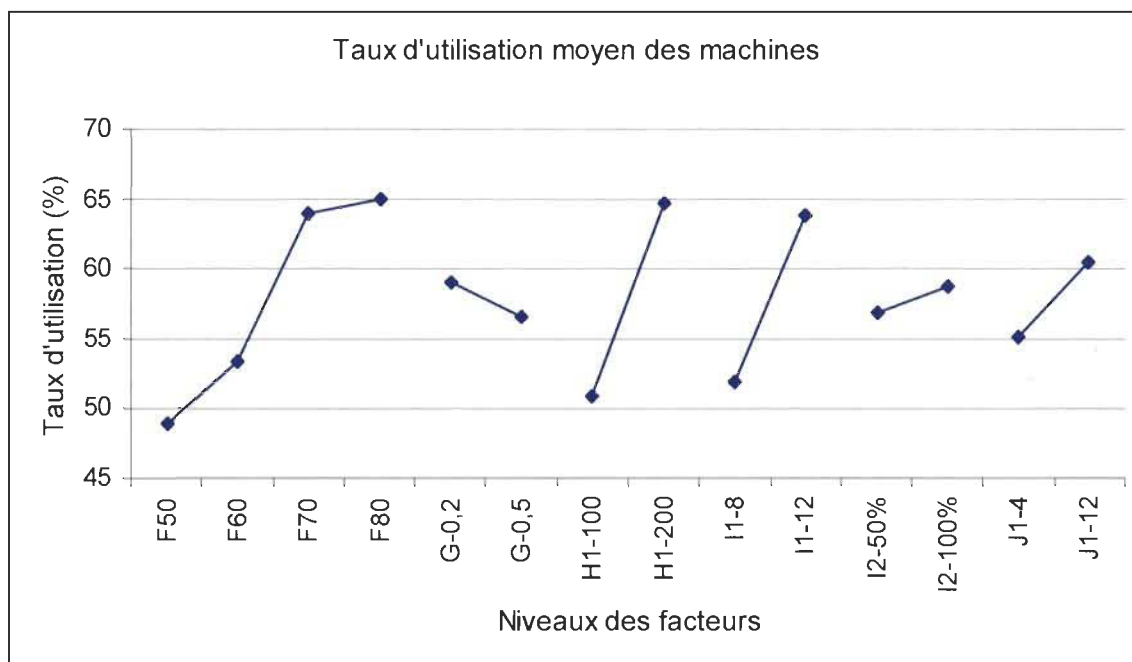


Figure 27. Effets significatifs sur le taux d'utilisation moyen

### Écart-type du taux d'utilisation

Tableau 42  
Analyse de variance de l'écart-type du taux d'utilisation

Source	dl	SC	V	F	Fcrit.	P(F)	SC'	p%
Règle (A)	3	26,81	8,94	1,85	2,20	84,91%	Rt. à l'erreur	
Système (B)	2	1,28	0,64	0,13	2,41	12,37%	Conservé pour B x I1	
Calendrier (C)	1	0,06	0,06	0,01	2,81	9,00%	Rt. à l'erreur	
Hor.config. (D)	1	25,00	25,00	5,17	2,81	97,26%	20,16	2,42%
Lot transfert (E)	1	12,25	12,25	2,53	2,81	88,20%	Rt. à l'erreur	
Nb. produits (F)	3	30,06	10,02	2,07	2,20	88,39%	Rt. à l'erreur	
Coût manutention (G)	1	2,25	2,25	0,47	2,81	50,15%	Rt. à l'erreur	
Taille commandes (H1)	1	217,56	217,56	44,97	2,81	100,00%	212,72	25,54%
Étendue taille comm. (H2)	1	6,25	6,25	1,29	2,81	73,88%	Rt. à l'erreur	
Cycle de vie (I1)	1	203,06	203,06	41,97	2,81	100,00%	198,22	23,80%
B x I1	2	29	14,39	2,97	2,41	93,96%	19,11	2,29%
H1 x I1	1	27,56	27,56	5,70	2,81	97,91%	22,72	2,73%
Étendue cycles (I2)	1	6,25	6,25	1,29	2,81	73,88%	Rt. à l'erreur	
Préavis (J1)	1	76,56	76,56	15,83	2,81	99,98%	71,72	8,61%
I1 x J1	1	16,06	16,06	3,32	2,81	92,55%	11,22	1,35%
Étendue préavis (J2)	1	3,06	3,06	0,63	2,81	56,99%	Rt. à l'erreur	
Erreur	49	237,06	4,84				285,44	34,27%
Totale	59	832,94					832,94	100%

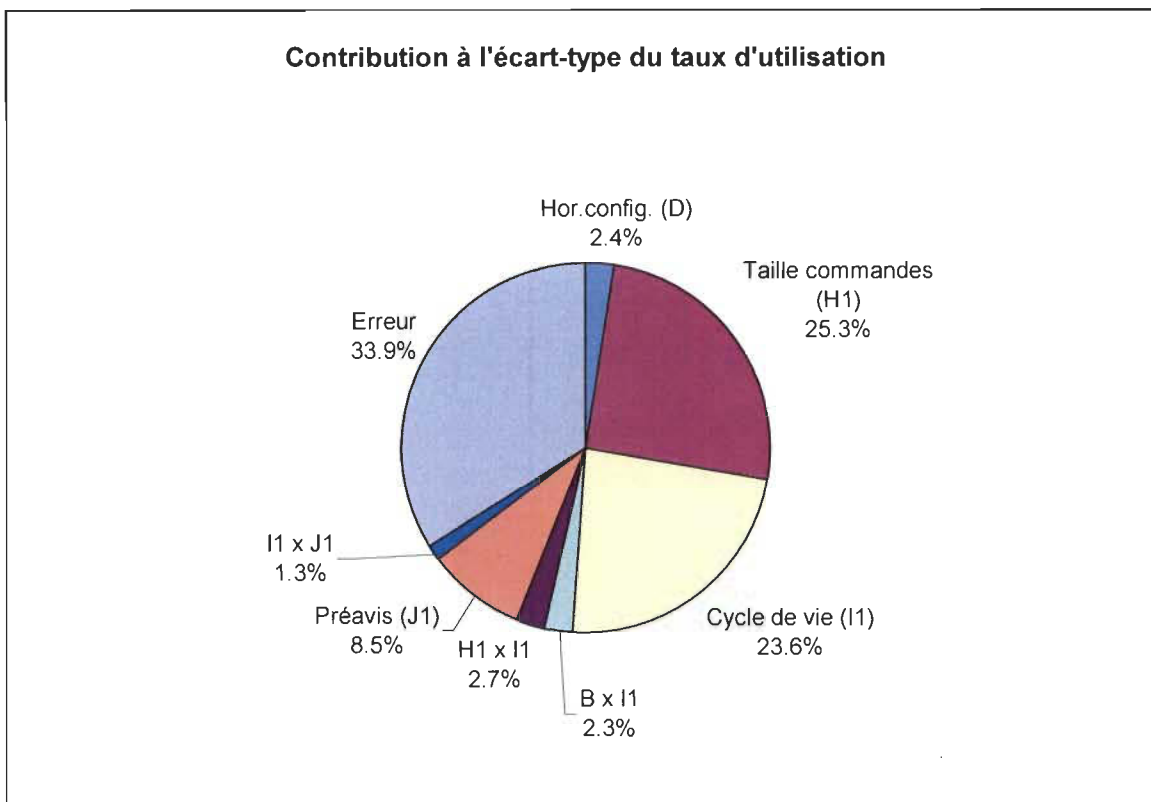


Figure 28. Contribution à l'écart-type du taux d'utilisation

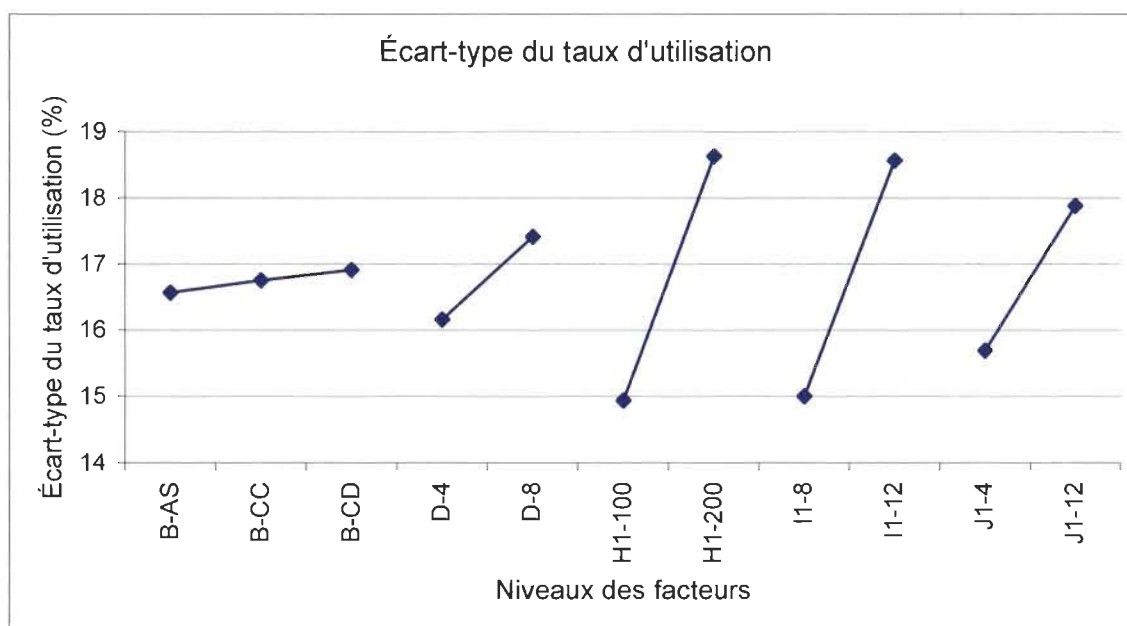


Figure 29. Effets significatifs sur l'écart-type du taux d'utilisation

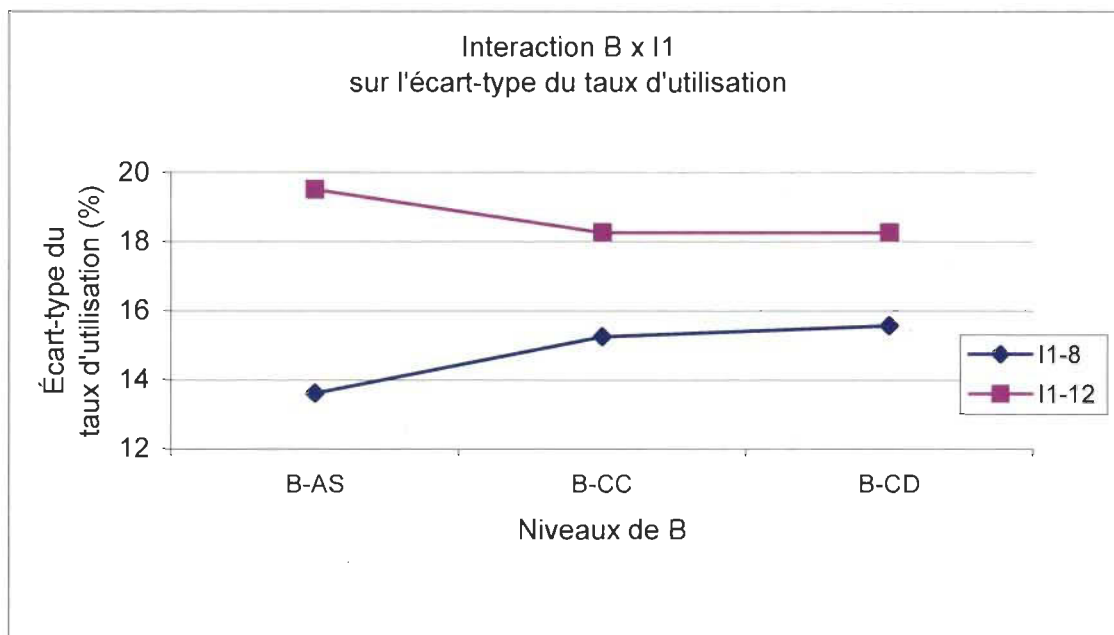


Figure 30. Interaction du système (B) et durée du cycle de vie (I1)

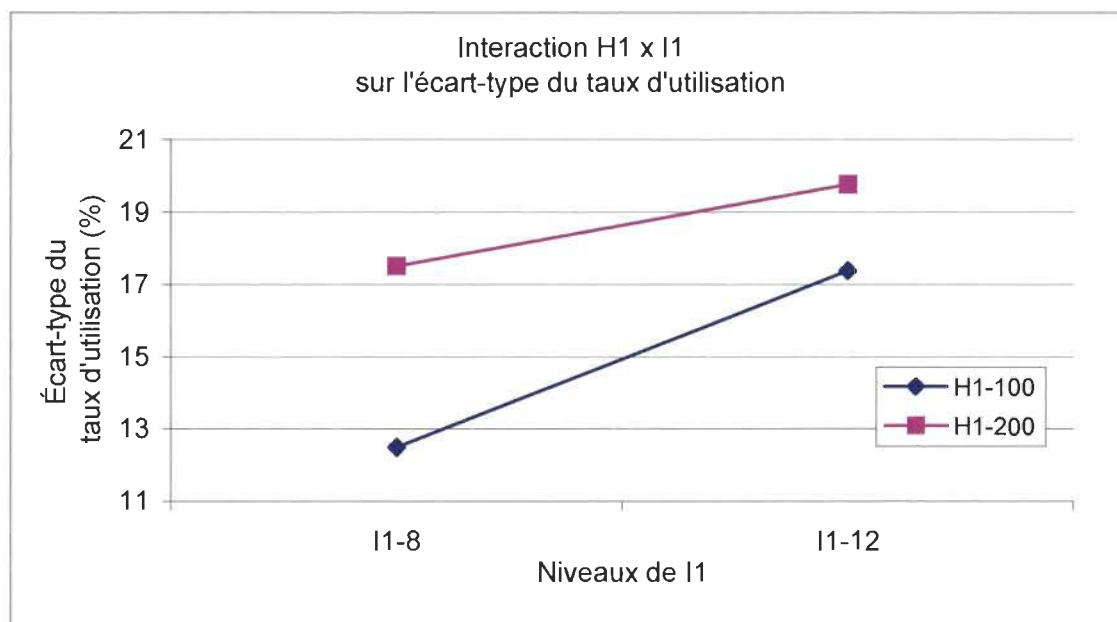


Figure 31. Interaction taille des commandes (H1) et durée du cycle de vie (I1)

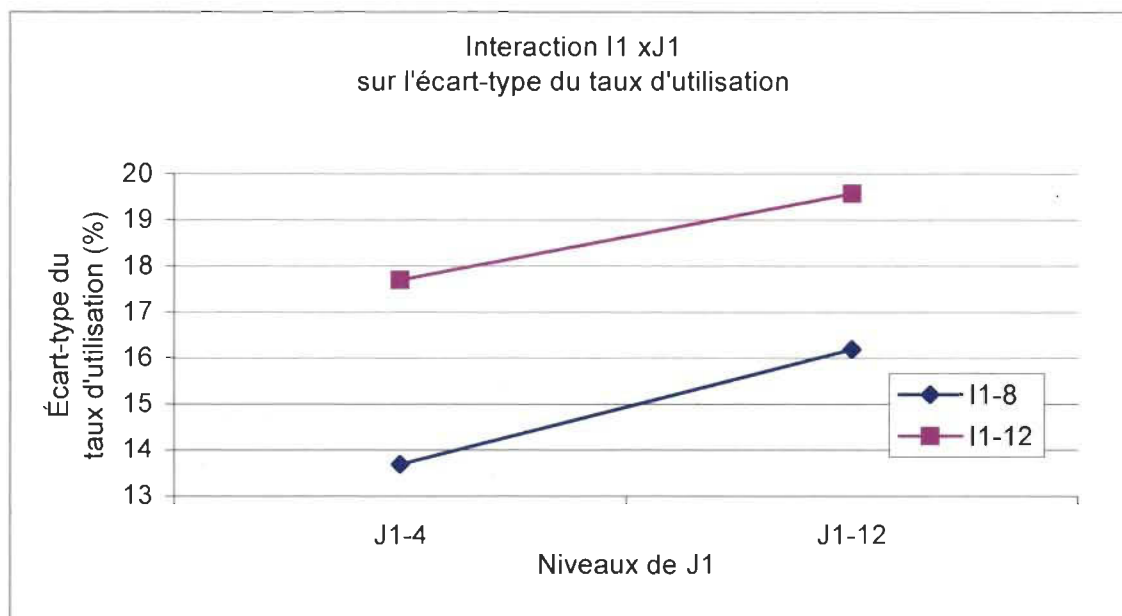


Figure 32. Interaction durée du cycle de vie (I1) et délai de préavis (J1)

### Taux d'utilisation minimum

Tableau 43  
Analyse de variance du taux d'utilisation minimum

Source	dl	SC	V	F	Fcrit.	P(F)	SC'	p%
Règle (A)	3	76,88	25,63	0,47	2,19	29,27%	Rt. à l'erreur	
Système (B)	2	36,13	18,06	0,33	2,41	27,85%	Rt. à l'erreur	
Calendrier (C)	1	0,25	0,25	0,00	2,80	5,35%	Rt. à l'erreur	
Hor.config. (D)	1	210,25	210,25	3,82	2,80	94,41%	155,25	2,40%
Lot transfert (E)	1	540,56	540,56	9,83	2,80	99,72%	485,57	7,52%
Nb. produits (F)	3	1 449,00	483,00	8,78	2,19	99,99%	1284,01	19,89%
Coût manutention (G)	1	3,06	3,06	0,06	2,80	18,56%	Rt. à l'erreur	
Taille commandes (H1)	1	855,56	855,56	15,56	2,80	99,98%	800,57	12,40%
Étendue taille comm. (H2)	1	68,06	68,06	1,24	2,80	72,89%	Rt. à l'erreur	
Cycle de vie (I1)	1	540,56	540,56	9,83	2,80	99,72%	485,57	7,52%
Étendue cycles (I2)	1	5,06	5,06	0,09	2,80	23,72%	Rt. à l'erreur	
Préavis (J1)	1	10,56	10,56	0,19	2,80	33,70%	Rt. à l'erreur	
Étendue préavis (J2)	1	22,56	22,56	0,41	2,80	47,53%	Rt. à l'erreur	
Erreur	52	2 859,81	55,00				3244,79	50,26%
Totale	59	6 455,75					6 455,75	100%

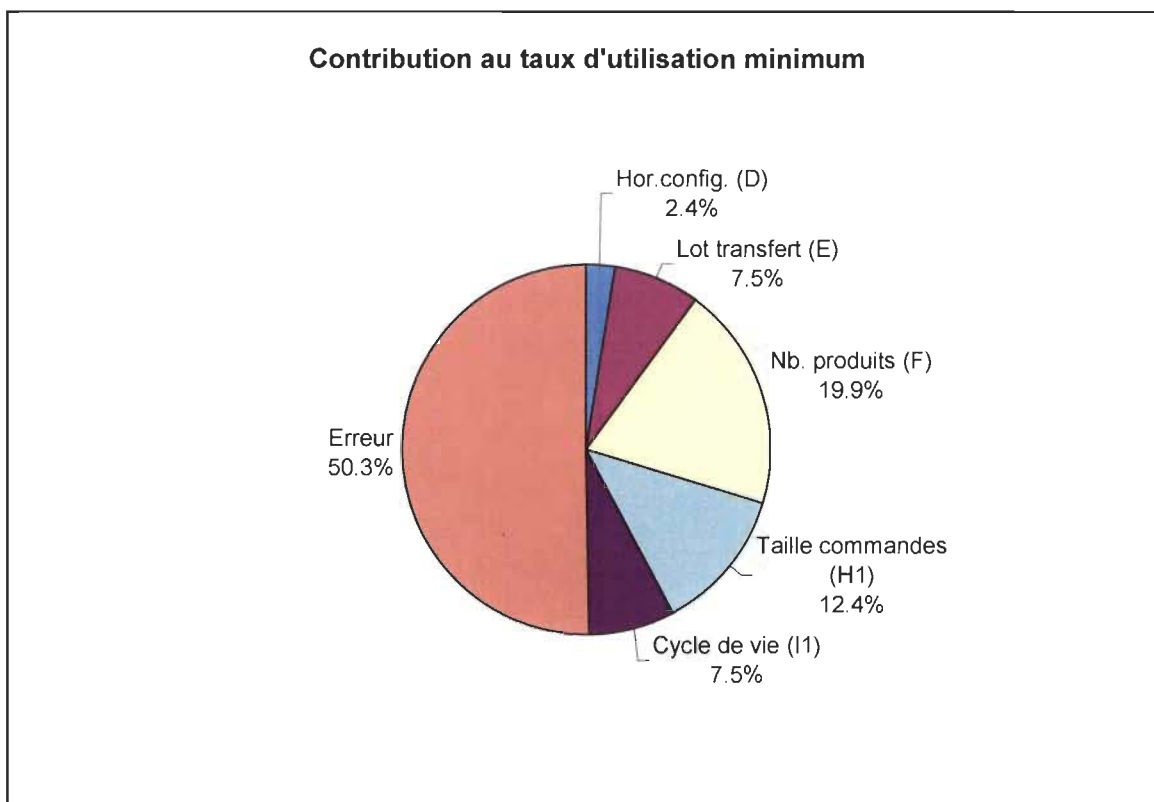


Figure 33. Contribution au taux d'utilisation minimum

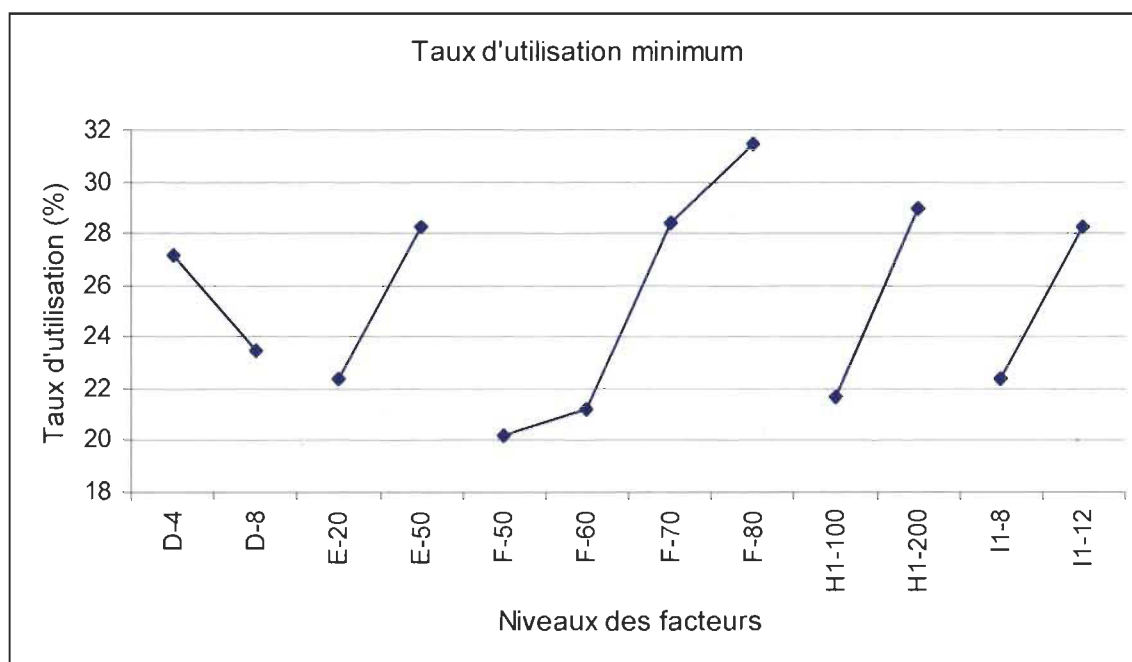


Figure 34. Effets significatifs sur le taux d'utilisation minimum

## Coût marginal total

Tableau 44  
Analyse de variance du coût marginal total

Source	dl	SC	V	F	Fcritique	P(F)	SC'	p%
Règle (A)	3	2,6E+09	8,7E+08	0,47	2,19	29,71%	Rt. à l'erreur	
Système (B)	2	1,6E+10	8,2E+09	4,45	2,41	98,35%	1,3E+10	5,08%
Calendrier (C)	1	2,1E+09	2,1E+09	1,15	2,81	71,22%	Rt. à l'erreur	
Hor.config. (D)	1	9,3E+08	9,3E+08	0,50	2,81	51,72%	Rt. à l'erreur	
Lot transfert (E)	1	3,8E+10	3,8E+10	20,27	2,81	100,00%	3,6E+10	14,17%
Nb. produits (F)	3	2,6E+10	8,6E+09	4,62	2,19	99,38%	2,0E+10	8,00%
Coût manutention (G)	1	6,5E+10	6,5E+10	35,11	2,81	100,00%	6,3E+10	25,09%
Taille commandes (H1)	1	4,7E+05	4,7E+05	0,00	2,81	1,27%	Rt. à l'erreur	
Étendue taille comm. (H2)	1	1,3E+09	1,3E+09	0,72	2,81	60,07%	Rt. à l'erreur	
Cycle de vie (I1)	1	1,3E+10	1,3E+10	6,78	2,81	98,79%	1,1E+10	4,25%
Étendue cycles (I2)	1	2,1E+09	2,1E+09	1,14	2,81	70,83%	Rt. à l'erreur	
Préavis (J1)	1	8,7E+07	8,7E+07	0,05	2,81	17,11%	Rt. à l'erreur	
Étendue préavis (J2)	1	1,3E+08	1,3E+08	0,07	2,81	20,94%	Rt. à l'erreur	
Erreur	51	9,4E+10	1,9E+09				1,1E+11	43,40%
Totale	59	2,5E+11					2,5E+11	100%

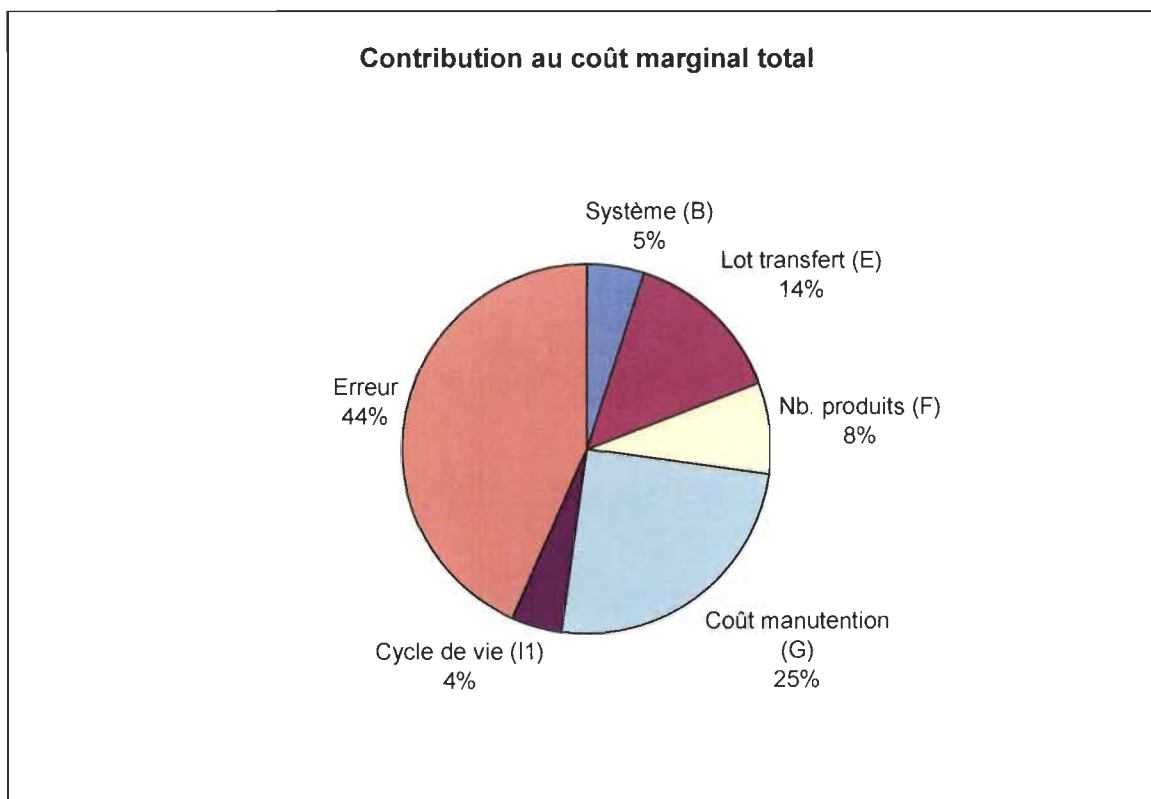


Figure 35. Contribution au coût marginal total

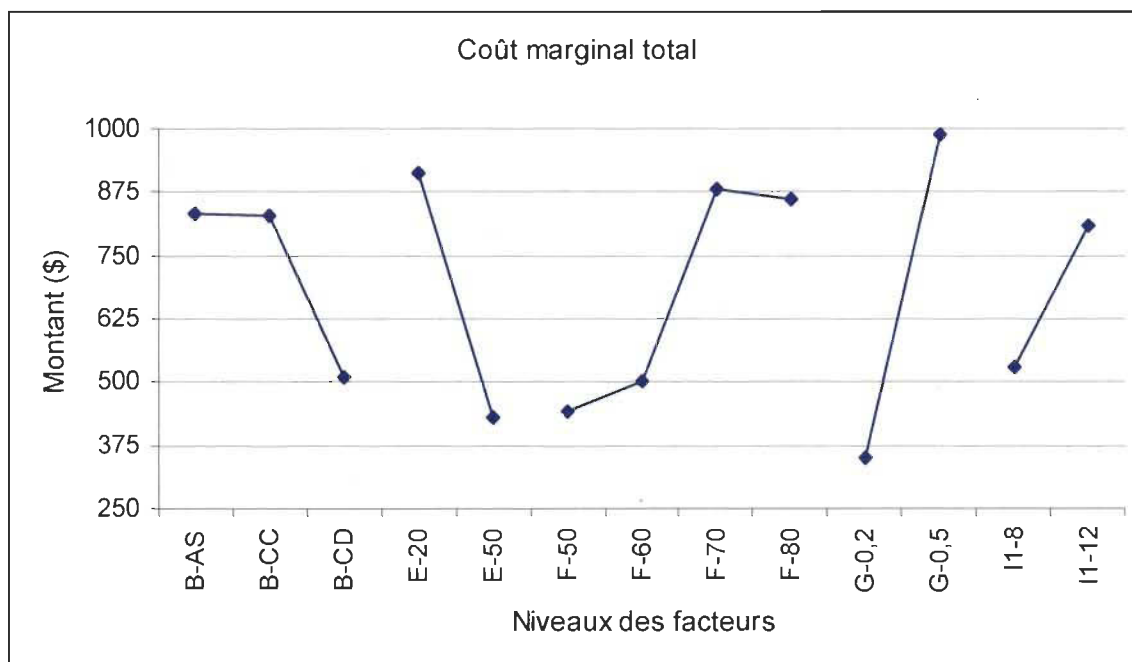


Figure 36. Effets significatifs sur le coût marginal total

### Encours moyen pondéré

Tableau 45  
Analyse de variance de l'encours moyen pondéré

Source	dl	SC	V	F	Fcrit.	P(F)	SC'	p%
Règle (A)	3	2,5E+05	8,2E+04	0,96	2,20	58,02%	Rt. à l'erreur	
Système (B)	2	1,9E+06	9,4E+05	11,05	2,41	99,99%	1,7E+06	5,32%
Calendrier (C)	1	1,6E+04	1,6E+04	0,18	2,81	32,82%	Rt. à l'erreur	
Hor.config. (D)	1	8,1E+06	8,1E+06	94,49	2,81	100,00%	8,0E+06	24,75%
Lot transfert (E)	1	1,4E+05	1,4E+05	1,61	2,81	78,96%	Rt. à l'erreur	
Nb. produits (F)	3	1,2E+06	4,1E+05	4,82	2,20	99,49%	9,8E+05	3,04%
Coût manutention (G)	1	3,3E+06	3,3E+06	38,16	2,81	100,00%	3,2E+06	9,84%
Taille commandes (H1)	1	7,3E+06	7,3E+06	85,35	2,81	100,00%	7,2E+06	22,33%
Étendue taille comm. (H2)	1	3,8E+03	3,8E+03	0,04	2,81	16,52%	Rt. à l'erreur	
Cycle de vie (I1)	1	5,0E+06	5,0E+06	58,54	2,81	100,00%	4,9E+06	15,23%
Étendue cycles (I2)	1	2,1E+05	2,1E+05	2,40	2,81	87,26%	Rt. à l'erreur	
Préavis (J1)	1	1,3E+06	1,3E+06	15,67	2,81	99,98%	1,3E+06	3,88%
Étendue préavis (J2)	1	2,7E+03	2,7E+03	0,03	2,81	14,12%	Rt. à l'erreur	
Erreur	49	4,2E+06	8,5E+04				5,0E+06	15,62%
Totale	59	3,2E+07					3,2E+07	100%



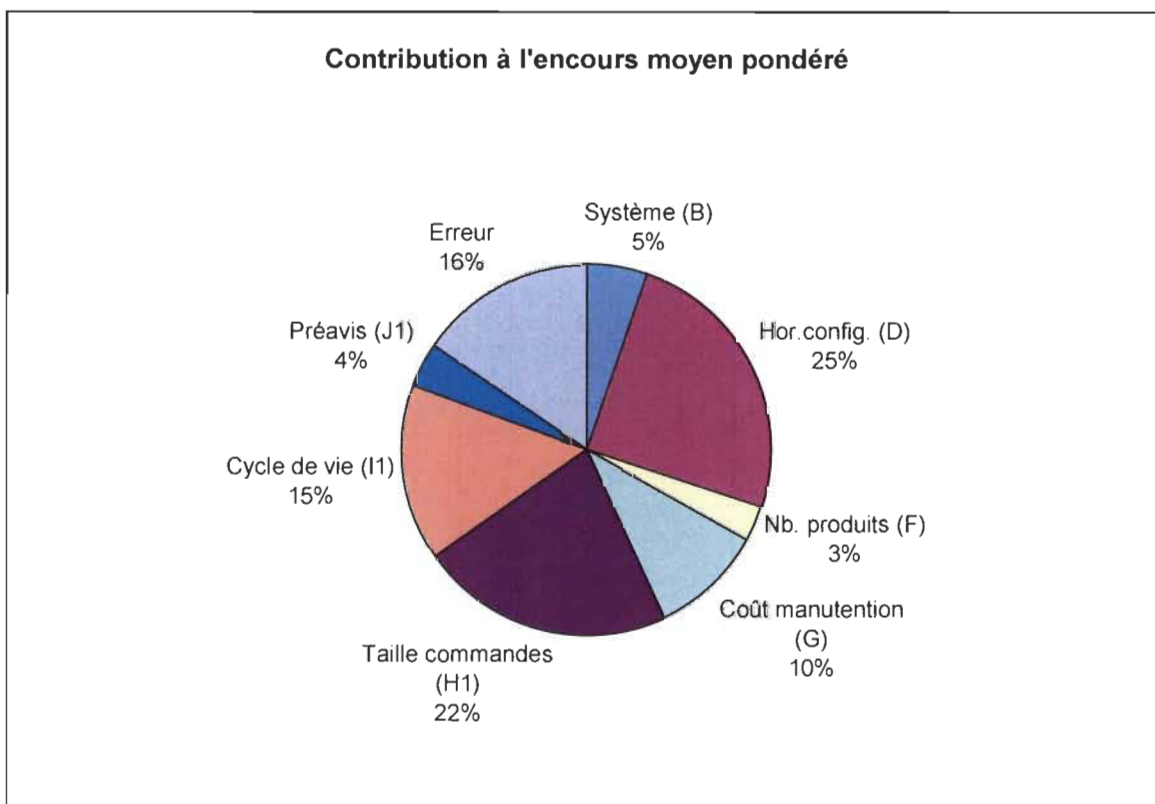


Figure 37. Contribution à l'encours moyen pondéré.

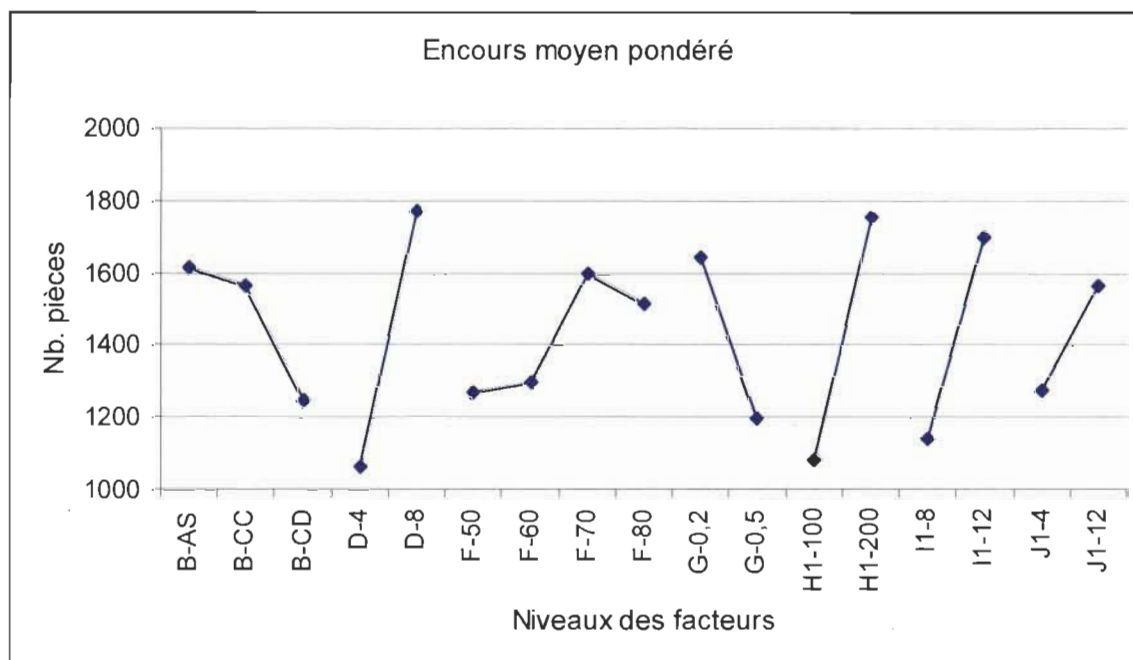


Figure 38. Effets significatifs sur l'encours moyen pondéré

## Écart-type pondéré de l'encours

Tableau 46  
Analyse de variance de l'écart-type pondéré de l'encours

Source	dl	SC	V	F	Fcrit.	P(F)	SC'	p%
Règle (A)	3	6,4E+05	2,1E+05	14,48	2,21	100,00%	6,0E+05	10,07%
Système (B)	2	3,2E+05	1,6E+05	10,97	2,42	99,99%	2,9E+05	4,97%
Calendrier (C)	1	9,9E+05	9,9E+05	67,01	2,82	100,00%	9,8E+05	16,44%
Hor.config. (D)	1	2,2E+06	2,2E+06	151,31	2,82	100,00%	2,2E+06	37,45%
Lot transfert (E)	1	3,5E+03	3,5E+03	0,24	2,82	37,09%	Rt. à l'erreur	
Nb. produits (F)	3	5,3E+05	1,8E+05	12,00	2,21	100,00%	4,9E+05	8,22%
Coût manutention (G)	1	1,1E+05	1,1E+05	7,39	2,82	99,07%	9,4E+04	1,59%
Taille commandes (H1)	1	7,3E+03	7,3E+03	0,50	2,82	51,52%	Rt. à l'erreur	
Étendue taille comm. (H2)	1	3,8E+03	3,8E+03	0,26	2,82	38,67%	Rt. à l'erreur	
Cycle de vie (I1)	1	1,2E+05	1,2E+05	8,24	2,82	99,38%	1,1E+05	1,80%
Étendue cycles (I2)	1	5,9E+03	5,9E+03	0,40	2,82	47,10%	Rt. à l'erreur	
Préavis (J1)	1	6,5E+04	6,5E+04	4,40	2,82	95,85%	5,0E+04	0,85%
Étendue préavis (J2)	1	2,5E+05	2,5E+05	16,71	2,82	99,98%	2,3E+05	3,91%
Erreur	45	6,7E+05	1,5E+04				8,7E+05	14,70%
Totale	59	5,9E+06					5,9E+06	100%

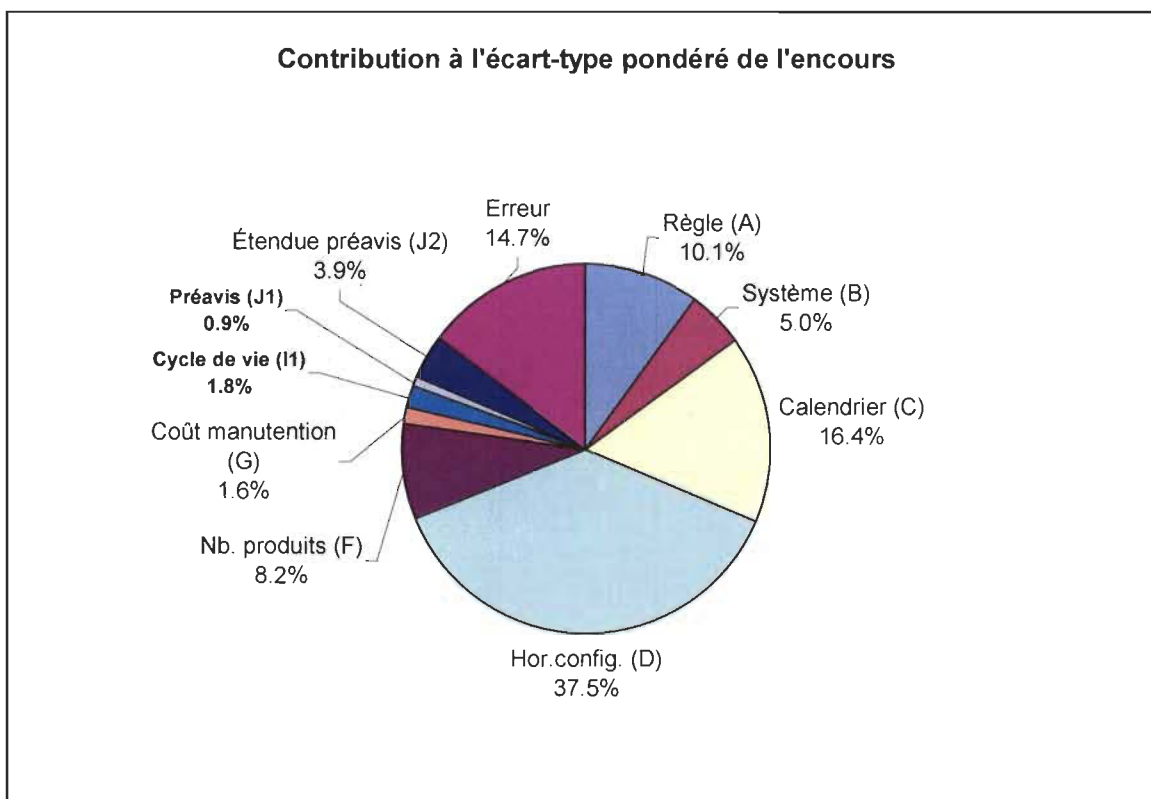


Figure 39. Contribution à la variabilité de l'écart-type pondéré de l'encours

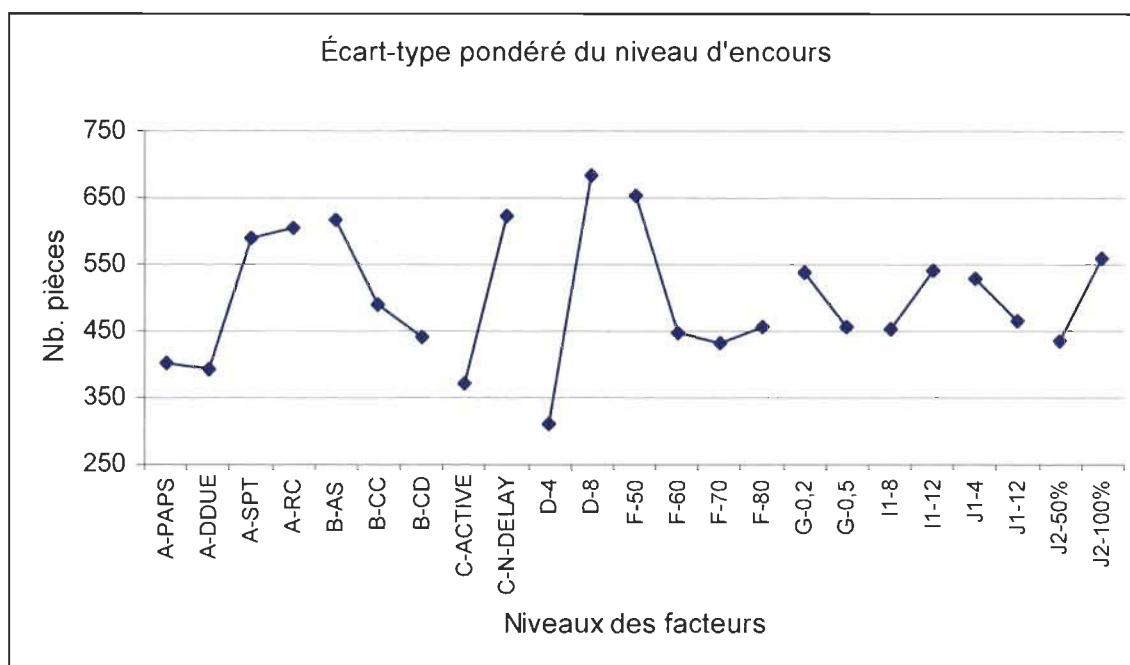


Figure 40. Effets significatifs sur l'écart-type pondéré de l'encours

### Encours maximal

Tableau 47  
Analyse de variance de l'encours maximal

Source	dl	SC	V	F	Fcrit.	P(F)	SC'	p%
Règle (A)	3	3,4E+06	1,1E+06	5,58	2,20	99,77%	2,8E+06	4,41%
Système (B)	2	6,9E+06	3,4E+06	16,85	2,42	100,00%	6,5E+06	10,17%
Calendrier (C)	1	2,4E+06	2,4E+06	11,99	2,82	99,89%	2,2E+06	3,53%
Hor.config. (D)	1	2,7E+07	2,7E+07	131,60	2,82	100,00%	2,7E+07	41,91%
Lot transfert (E)	1	3,7E+04	3,7E+04	0,18	2,82	32,73%	Rt. à l'erreur	
Nb. produits (F)	3	1,2E+06	4,0E+05	1,98	2,20	87,06%	Rt. à l'erreur	
Coût manutention (G)	1	3,5E+06	3,5E+06	17,16	2,82	99,99%	3,3E+06	5,19%
Taille commandes (H1)	1	4,4E+06	4,4E+06	21,45	2,82	100,00%	4,2E+06	6,56%
Étendue taille comm. (H2)	1	2,2E+05	2,2E+05	1,09	2,82	69,90%	Rt. à l'erreur	
Cycle de vie (I1)	1	3,5E+06	3,5E+06	17,07	2,82	99,99%	3,3E+06	5,16%
Étendue cycles (I2)	1	5,4E+05	5,4E+05	2,65	2,82	88,97%	Rt. à l'erreur	
Préavis (J1)	1	2,0E+06	2,0E+06	9,90	2,82	99,71%	1,8E+06	2,86%
Étendue préavis (J2)	1	1,0E+06	1,0E+06	4,99	2,82	96,97%	8,1E+05	1,28%
Erreur	47	9,6E+06	2,0E+05				1,2E+07	18,94%
Totale	59	6,4E+07					6,4E+07	100%

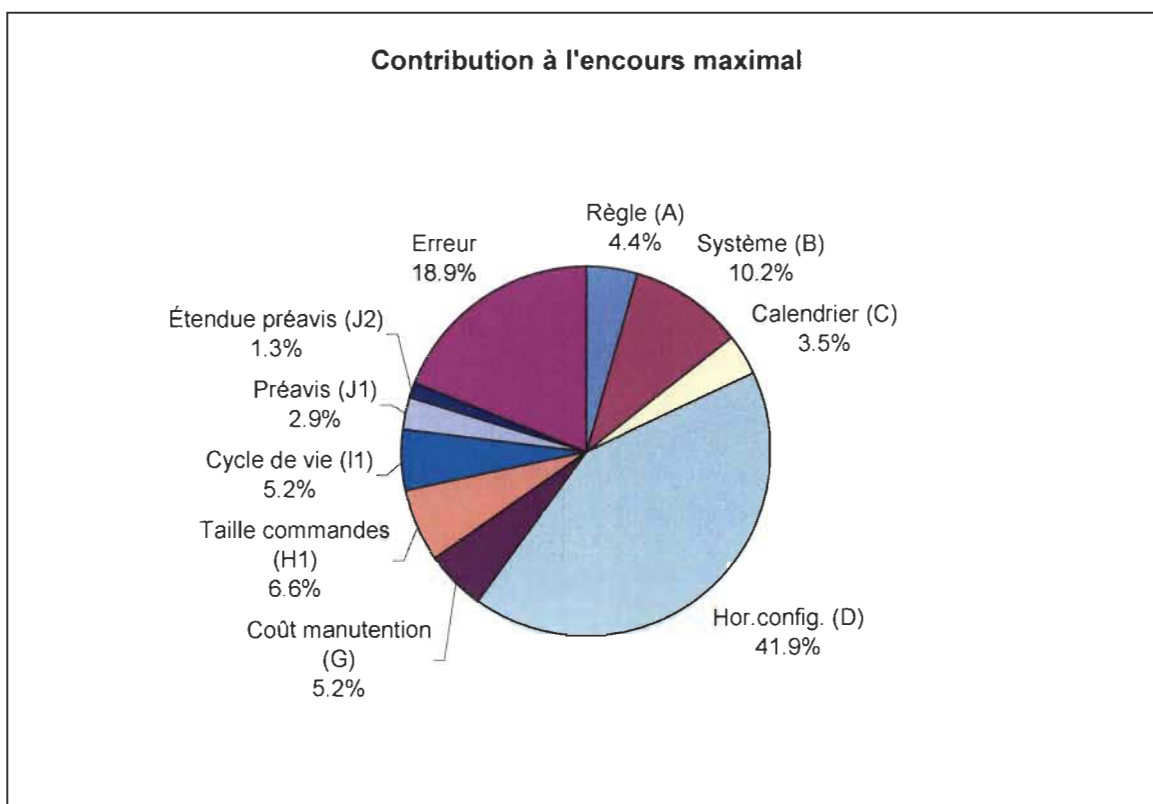


Figure 41. Contribution à l'encours maximal

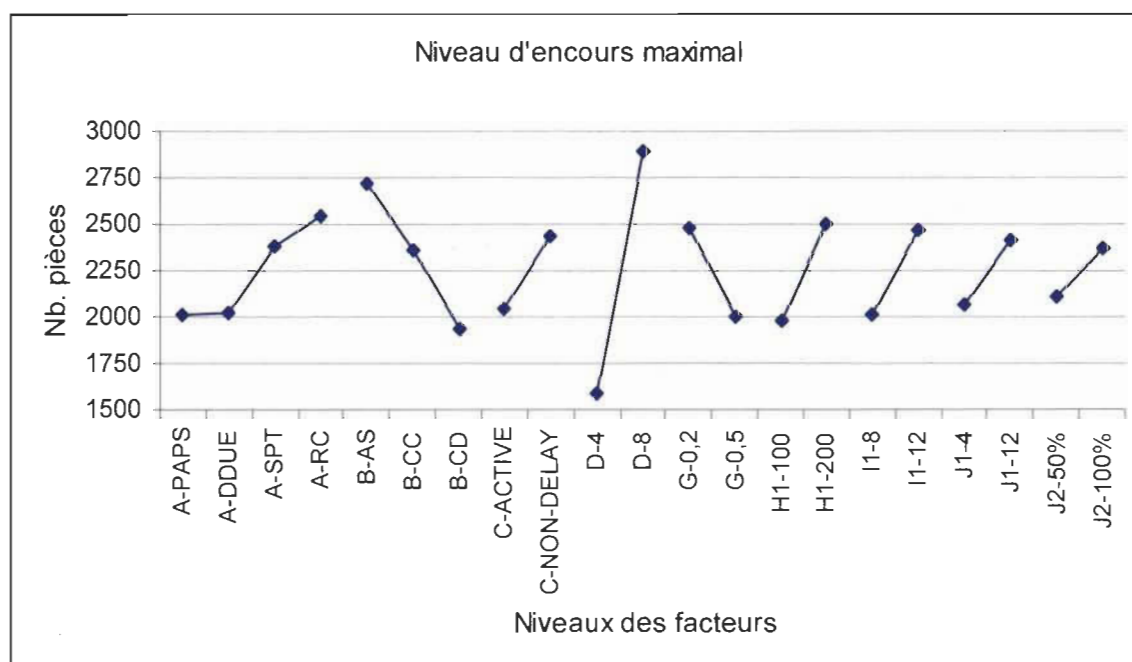


Figure 42. Effets significatifs sur l'encours maximal

## Jeu moyen pondéré

Tableau 48  
Analyse de variance du jeu moyen pondéré

Source	dl	SC	V	F	Fcrit.	P(F)	SC'	p%
Règle (A)	3	3,3E+08	1,1E+08	33,50	2,21	100,00%	3,2E+08	13,94%
Système (B)	2	5,3E+07	2,7E+07	8,16	2,42	99,91%	4,7E+07	2,05%
Calendrier (C)	1	1,8E+06	1,8E+06	0,54	2,82	53,41%	Rt. à l'erreur	
Hor.config. (D)	1	3,8E+05	3,8E+05	0,12	2,82	26,46%	Rt. à l'erreur	
Lot transfert (E)	1	5,2E+06	5,2E+06	1,59	2,82	78,60%	Rt. à l'erreur	
Nb. produits (F)	3	5,4E+07	1,8E+07	5,51	2,21	99,74%	4,4E+07	1,93%
Coût manutention (G)	1	2,3E+07	2,3E+07	7,15	2,82	98,96%	2,0E+07	0,88%
Taille commandes (H1)	1	3,5E+08	3,5E+08	108,88	2,82	100,00%	3,5E+08	15,42%
Étendue taille comm. (H2)	1	1,9E+07	1,9E+07	5,85	2,82	98,03%	1,6E+07	0,69%
Cycle de vie (I1)	1	3,9E+07	3,9E+07	11,99	2,82	99,88%	3,6E+07	1,57%
Étendue cycles (I2)	1	4,5E+05	4,5E+05	0,14	2,82	28,93%	Rt. à l'erreur	
Préavis (J1)	1	1,2E+09	1,2E+09	374,44	2,82	100,00%	1,2E+09	53,39%
Étendue préavis (J2)	1	4,2E+07	4,2E+07	12,74	2,82	99,91%	3,8E+07	1,68%
Erreur	45	1,5E+08	3,3E+06				1,9E+08	8,44%
Totale	59	2,3E+09					2,3E+09	100%

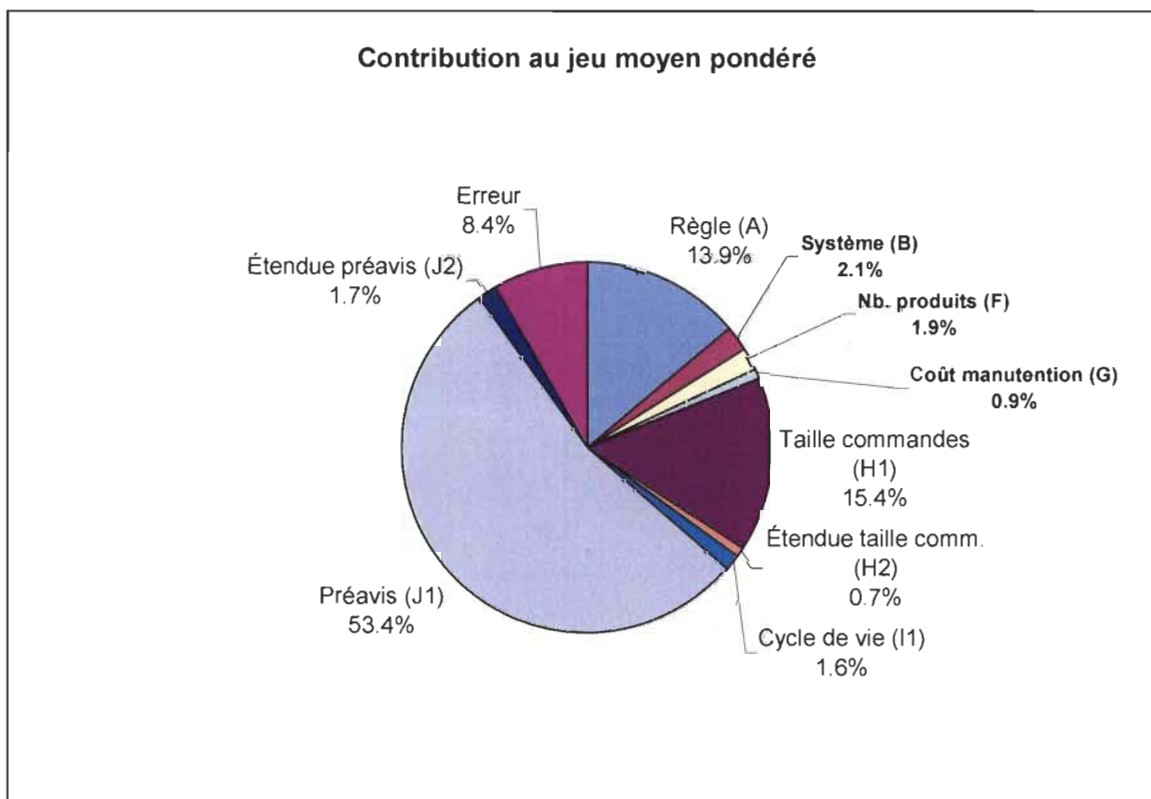


Figure 43. Contribution au jeu moyen pondéré

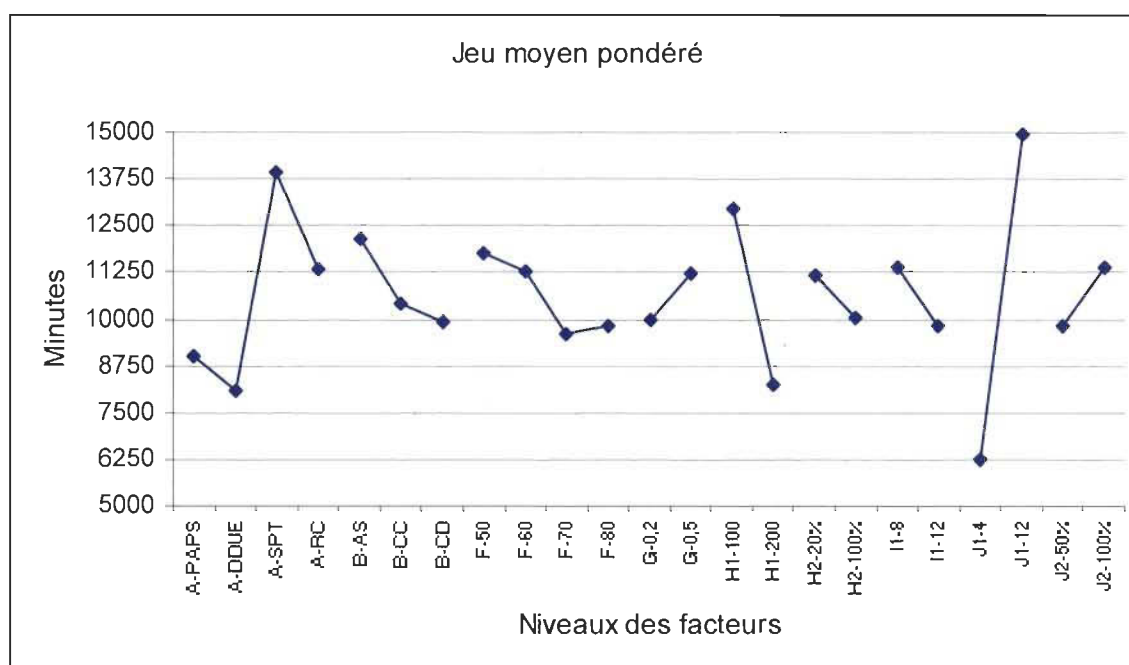


Figure 44. Effets significatifs sur le jeu moyen pondéré

## Écart-type pondéré du jeu

Tableau 49  
Analyse de variance de l'écart-type pondéré du jeu

Source	dl	SC	V	F	Fcritique	P(F)	SC'	p%
Règle (A)	3	4,2E+08	1,4E+08	53,83	2,21	100,00%	4,2E+08	16,13%
Système (B)	2	5,6E+07	2,8E+07	10,75	2,42	99,98%	5,1E+07	1,98%
Calendrier (C)	1	4,3E+06	4,3E+06	1,64	2,82	79,25%		Rt. à l'erreur
Hor.config. (D)	1	8,3E+04	8,3E+04	0,03	2,82	14,06%		Rt. à l'erreur
Lot transfert (E)	1	3,3E+06	3,3E+06	1,25	2,82	73,02%		Rt. à l'erreur
Nb. produits (F)	3	4,2E+07	1,4E+07	5,38	2,21	99,70%	3,4E+07	1,34%
Coût manutention (G)	1	1,8E+07	1,8E+07	6,85	2,82	98,80%	1,5E+07	0,60%
Taille commandes (H1)	1	2,5E+08	2,5E+08	97,12	2,82	100,00%	2,5E+08	9,78%
Étendue taille comm. (H2)	1	1,6E+07	1,6E+07	5,95	2,82	98,12%	1,3E+07	0,50%
Cycle de vie (I1)	1	2,5E+07	2,5E+07	9,53	2,82	99,65%	2,2E+07	0,87%
Étendue cycles (I2)	1	1,1E+06	1,1E+06	0,40	2,82	47,03%		Rt. à l'erreur
Préavis (J1)	1	1,6E+09	1,6E+09	595,99	2,82	100,00%	1,6E+09	60,53%
Étendue préavis (J2)	1	6,1E+07	6,1E+07	23,32	2,82	100,00%	5,9E+07	2,27%
Erreur	45	1,2E+08	2,6E+06				1,5E+08	6,00%
Totale	59	2,6E+09					2,6E+09	100%

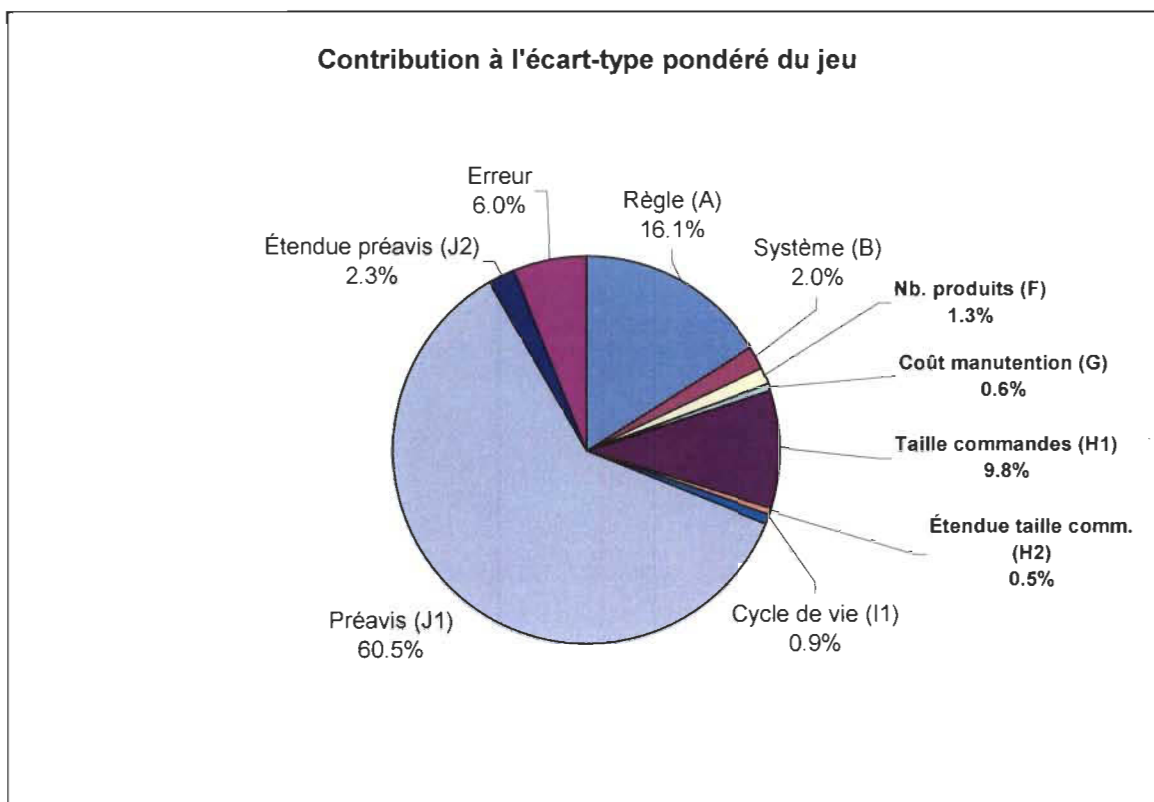


Figure 45. Contribution à l'écart-type pondéré du jeu

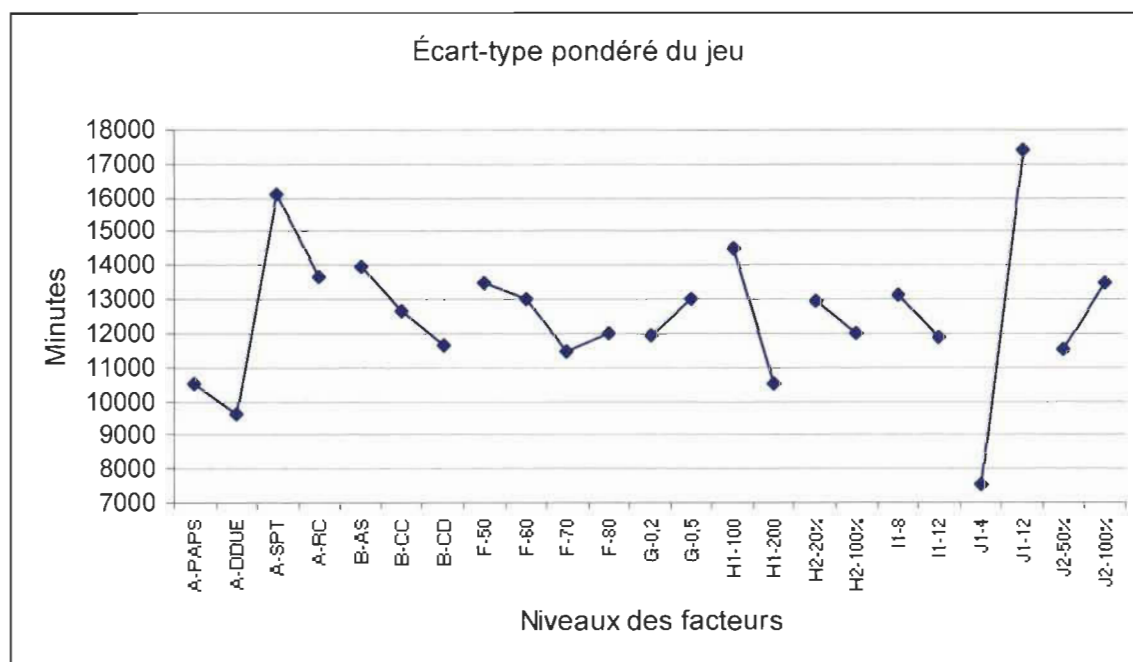


Figure 46. Effets significatifs sur l'écart-type pondéré du jeu

## Jeu maximal

Tableau 50  
Analyse de variance du jeu maximal

Source	dl	SC	V	F	Fcrit.	P(F)	SC'	p%
Règle (A)	3	5,2E+09	1,7E+09	55,17	2,20	100,00%	5,1E+09	33,09%
Système (B)	2	5,0E+08	2,5E+08	7,91	2,41	99,89%	4,3E+08	2,81%
Calendrier (C)	1	3,5E+08	3,5E+08	11,25	2,81	99,85%	3,2E+08	2,09%
Hor.config. (D)	1	3,5E+07	3,5E+07	1,13	2,81	70,74%	Rt. à l'erreur	
Lot transfert (E)	1	8,3E+07	8,3E+07	2,65	2,81	88,98%	Rt. à l'erreur	
Nb. produits (F)	3	2,0E+08	6,8E+07	2,18	2,20	89,79%	Rt. à l'erreur	
Coût manutention (G)	1	2,3E+07	2,3E+07	0,74	2,81	60,62%	Rt. à l'erreur	
Taille commandes (H1)	1	1,1E+09	1,1E+09	34,61	2,81	100,00%	1,1E+09	6,84%
Étendue taille comm. (H2)	1	3,7E+05	3,7E+05	0,01	2,81	8,62%	Rt. à l'erreur	
Cycle de vie (I1)	1	1,8E+08	1,8E+08	5,83	2,81	98,04%	1,5E+08	0,98%
Étendue cycles (I2)	1	1,6E+08	1,6E+08	5,09	2,81	97,14%	1,3E+08	0,83%
Préavis (J1)	1	6,4E+09	6,4E+09	204,01	2,81	100,00%	6,4E+09	41,34%
Étendue préavis (J2)	1	6,5E+07	6,5E+07	2,07	2,81	84,39%	Rt. à l'erreur	
Erreur	49	1,5E+09	3,1E+07				1,8E+09	12,01%
Totale	59	1,5E+10					1,5E+10	100%

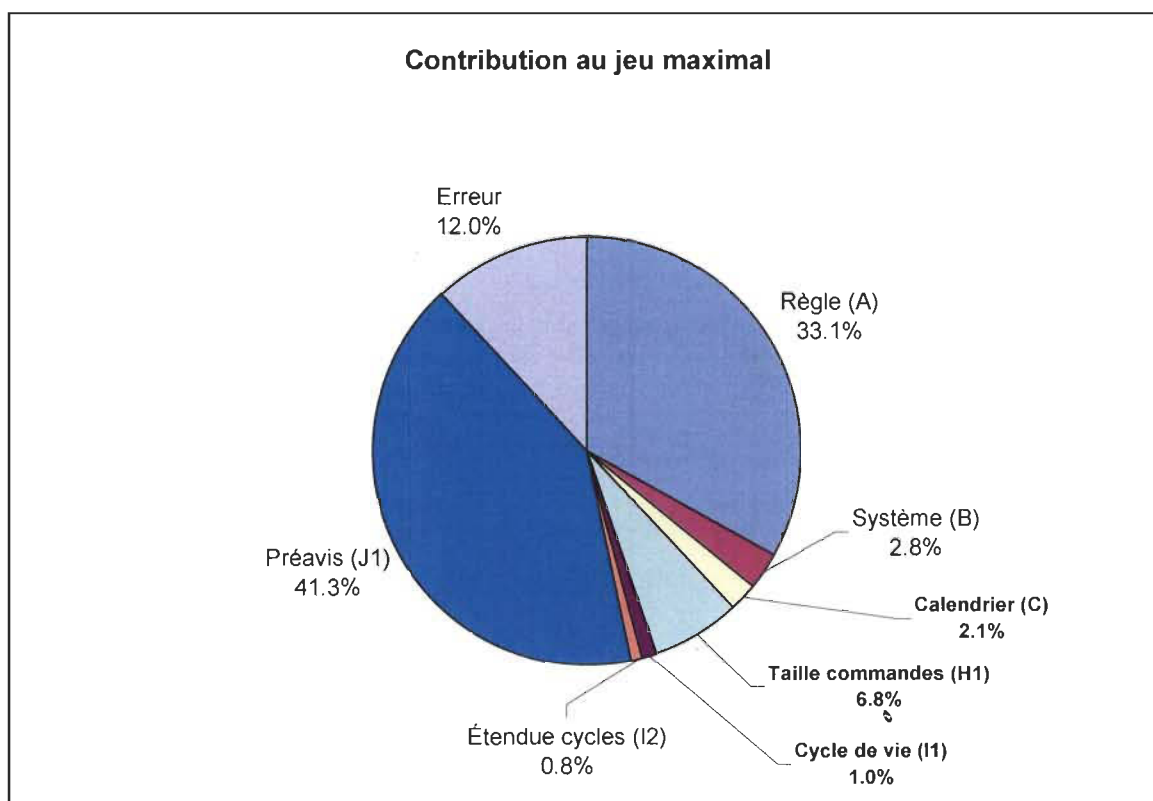


Figure 47. Contribution au jeu maximal



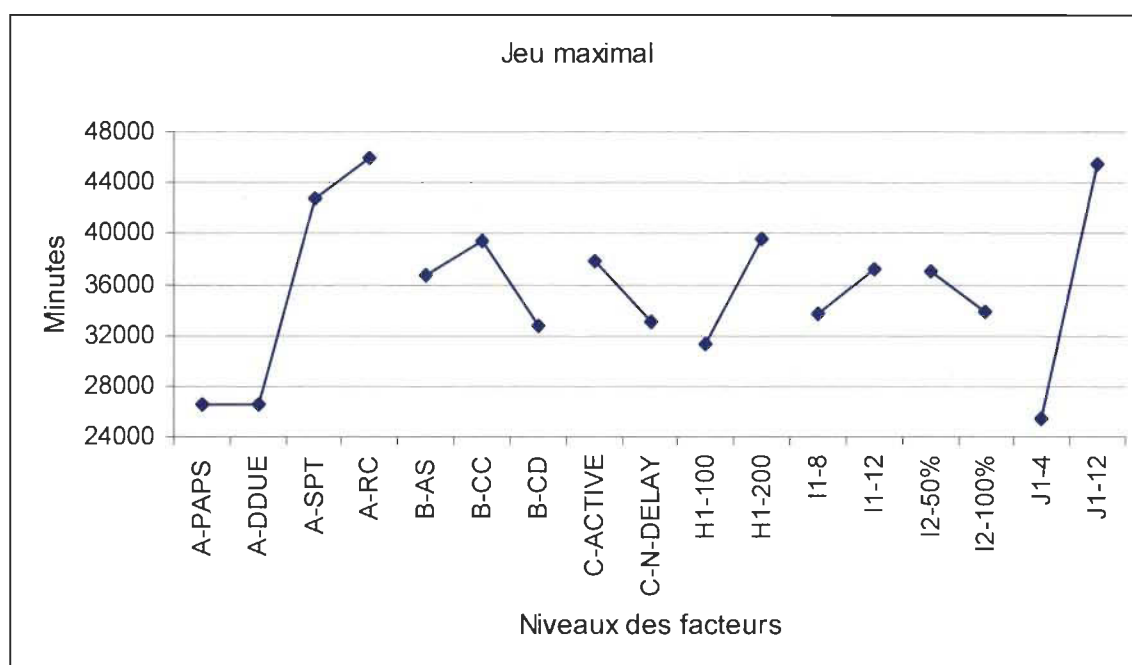


Figure 48. Effets significatifs sur le jeu maximal

### Retard moyen pondéré

Tableau 51  
Analyse de variance du retard moyen pondéré

Source	dl	SC	V	F	Fcrit.	P(F)	SC'	p%
Règle (A)	3	592,19	197,40	8,04	2,20	99,98%	518,54	14,63%
Système (B)	2	310,03	155,02	6,31	2,42	99,63%	260,93	7,36%
Calendrier (C)	1	4,00	4,00	0,16	2,81	31,17%		Rt. à l'erreur
Hor.config. (D)	1	18,06	18,06	0,74	2,81	60,47%		Rt. à l'erreur
Lot transfert (E)	1	6,25	6,25	0,25	2,81	38,38%		Rt. à l'erreur
Nb. produits (F)	3	36,56	12,19	0,50	2,20	31,35%		Rt. à l'erreur
Coût manutention (G)	1	85,56	85,56	3,49	2,81	93,20%	61,01	1,72%
Taille commandes (H1)	1	702,25	702,25	28,61	2,81	100,00%	677,70	19,12%
Étendue taille comm. (H2)	1	22,56	22,56	0,92	2,81	65,75%		Rt. à l'erreur
Cycle de vie (I1)	1	39,06	39,06	1,59	2,81	78,68%		Rt. à l'erreur
Étendue cycles (I2)	1	6,25	6,25	0,25	2,81	38,38%		Conservé pour B x I2
B x I2	2	309	154,67	6,30	2,42	99,63%	260,25	7,34%
Préavis (J1)	1	361,00	361,00	14,71	2,81	99,96%	336,45	9,49%
Étendue préavis (J2)	1	39,06	39,06	1,59	2,81	78,68%		Rt. à l'erreur
Erreur	48	1 178,31	24,55				1448,3	40,86%
Totale	59	3 544,94					3 544,9	100%

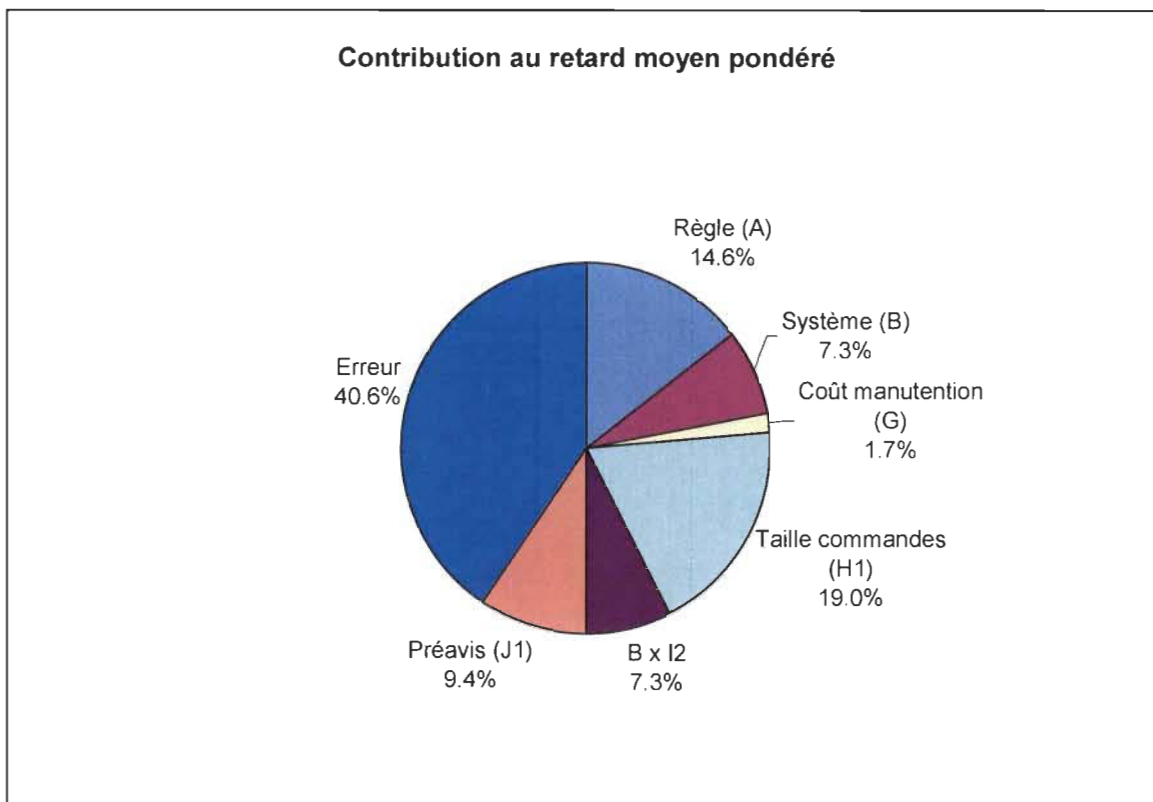


Figure 49. Contribution au retard moyen pondéré

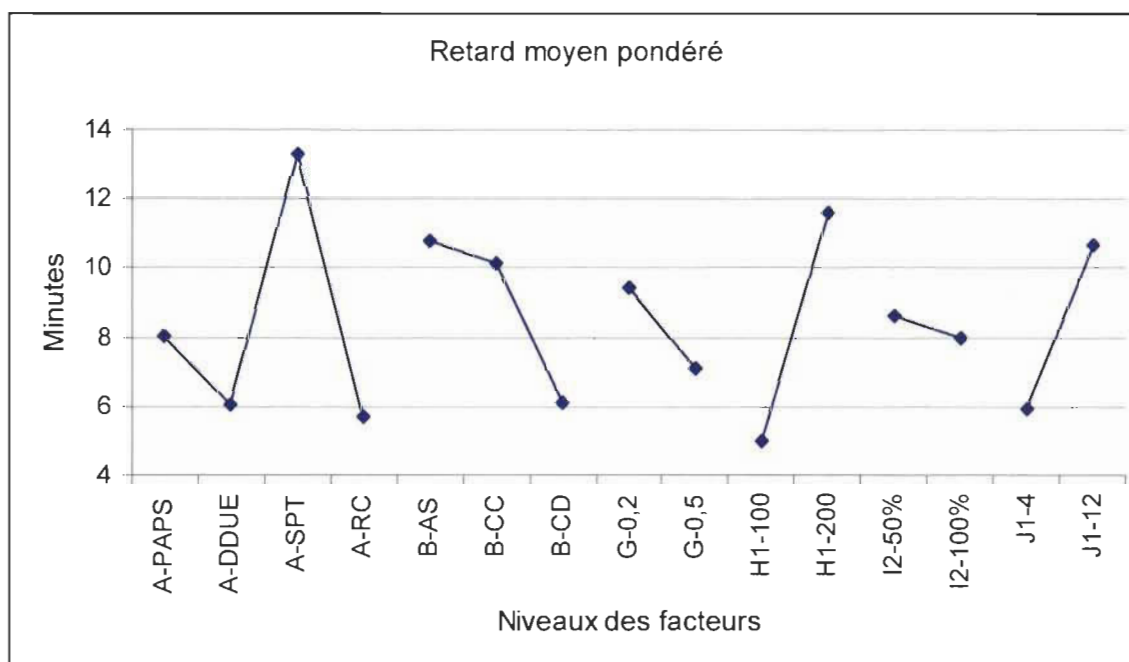


Figure 50. Effets significatifs sur le retard moyen pondéré

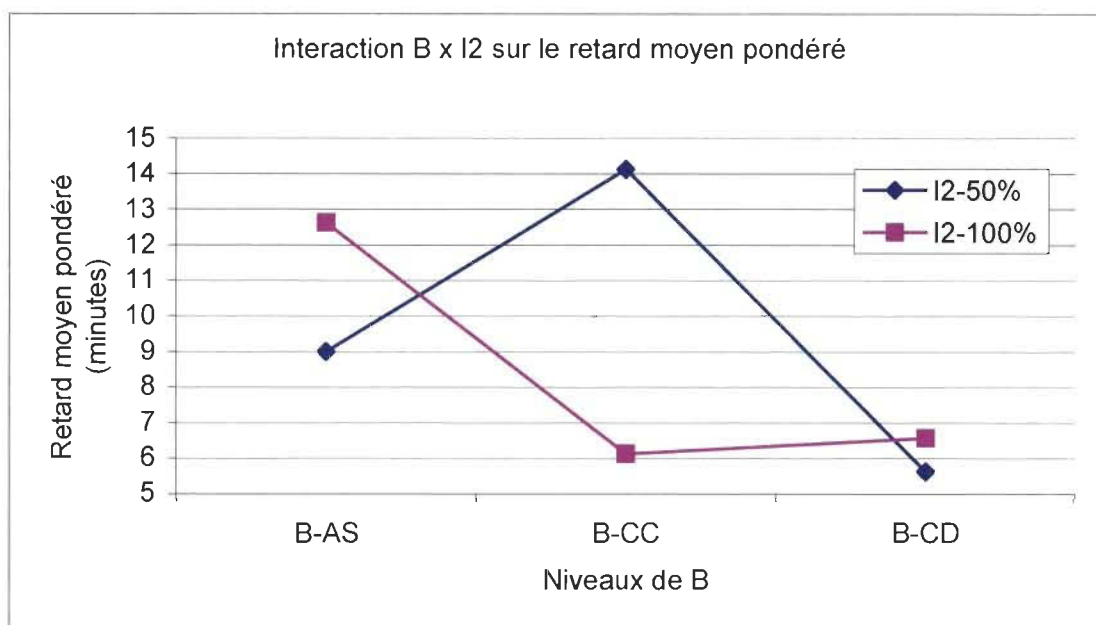


Figure 51. Interaction de l'étendue des durées des cycles de vie (I2) et du système (B)

### Écart-type pondéré du retard

Tableau 52  
Analyse de variance de l'écart-type pondéré du retard

Source	dl	SC	V	F	Fcrit.	P(F)	SC'	p%
Règle (A)	3	650111	216704	13,98	2,21	100,00%	6,0E+05	20,88%
Système (B)	2	311534	155767	10,05	2,42	99,98%	2,8E+05	9,70%
Calendrier (C)	1	27639	27639	1,78	2,82	81,15%	Rt. à l'erreur	
Hor.config. (D)	1	361	361	0,02	2,82	12,06%	Rt. à l'erreur	
Lot transfert (E)	1	169	169	0,01	2,82	8,27%	Rt. à l'erreur	
Nb. produits (F)	3	76879	25626	1,65	2,21	80,95%	Rt. à l'erreur	
Coût manutention (G)	1	70490	70490	4,55	2,82	96,16%	5,5E+04	1,90%
Taille commandes (H1)	1	535092	535092	34,52	2,82	100,00%	5,2E+05	17,97%
Étendue taille comm. (H2)	1	13398	13398	0,86	2,82	64,25%	Rt. à l'erreur	
Cycle de vie (I1)	1	54056	54056	3,49	2,82	93,17%	3,9E+04	1,33%
Étendue cycles (I2)	1	10455	10455	0,67	2,82	58,42%	Conservé pour B x I2	
B x I2	2	166073	83037	5,36	2,42	99,18%	1,4E+05	4,67%
H1 x I2	1	52785	52785	3,41	2,82	92,84%	3,7E+04	1,29%
Préavis (J1)	1	315563	315563	20,36	2,82	100,00%	3,0E+05	10,38%
Étendue préavis (J2)	1	4193	4193	0,27	2,82	39,45%	Rt. à l'erreur	
Erreur	45	697446	15499				9,1E+05	31,63%
Totale	59	2,9E+06					2,91+06	100%

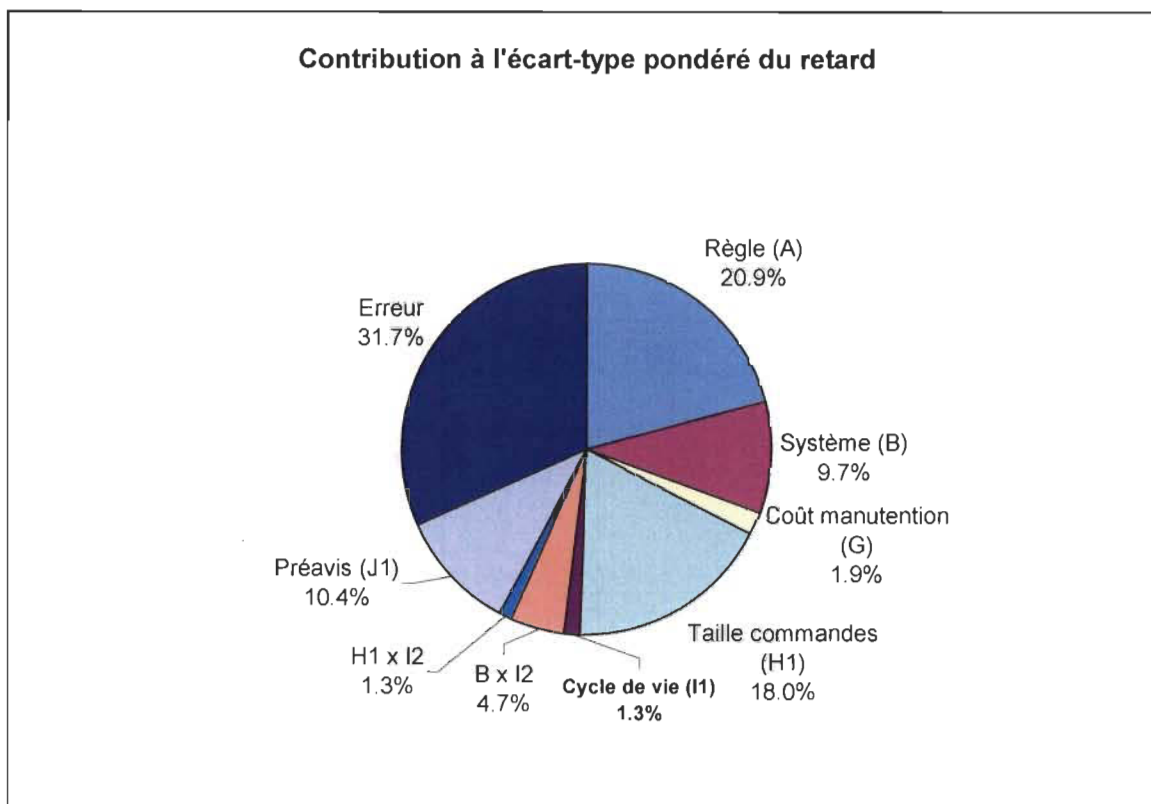


Figure 52. Contribution à l'écart-type pondéré du retard

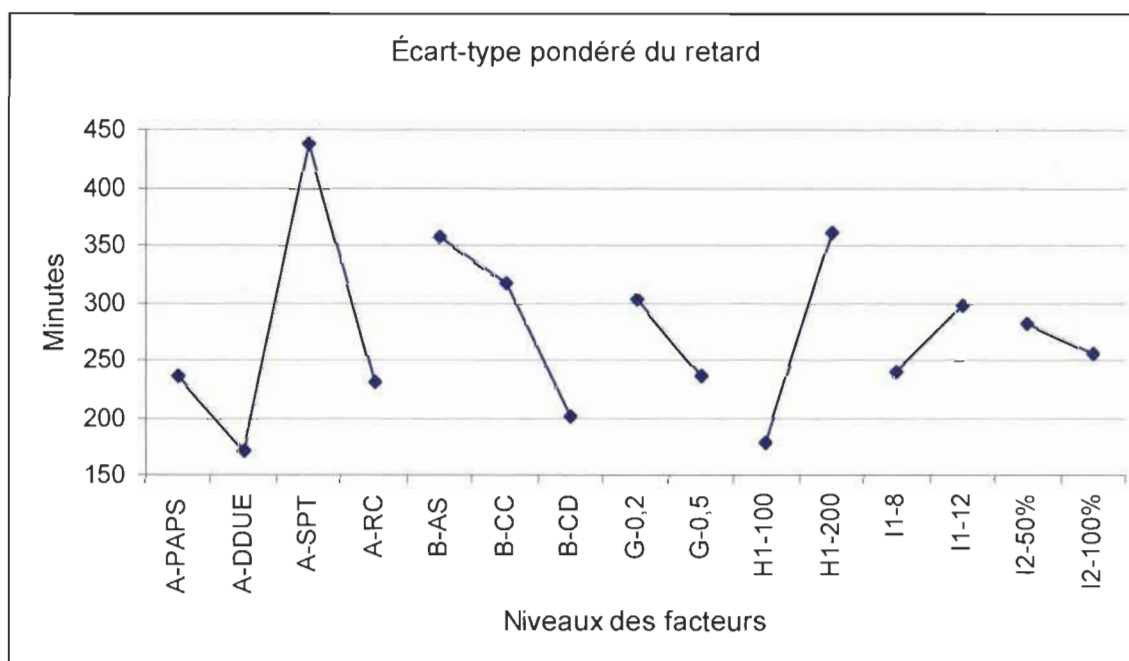


Figure 53. Effets significatifs sur l'écart-type pondéré du retard

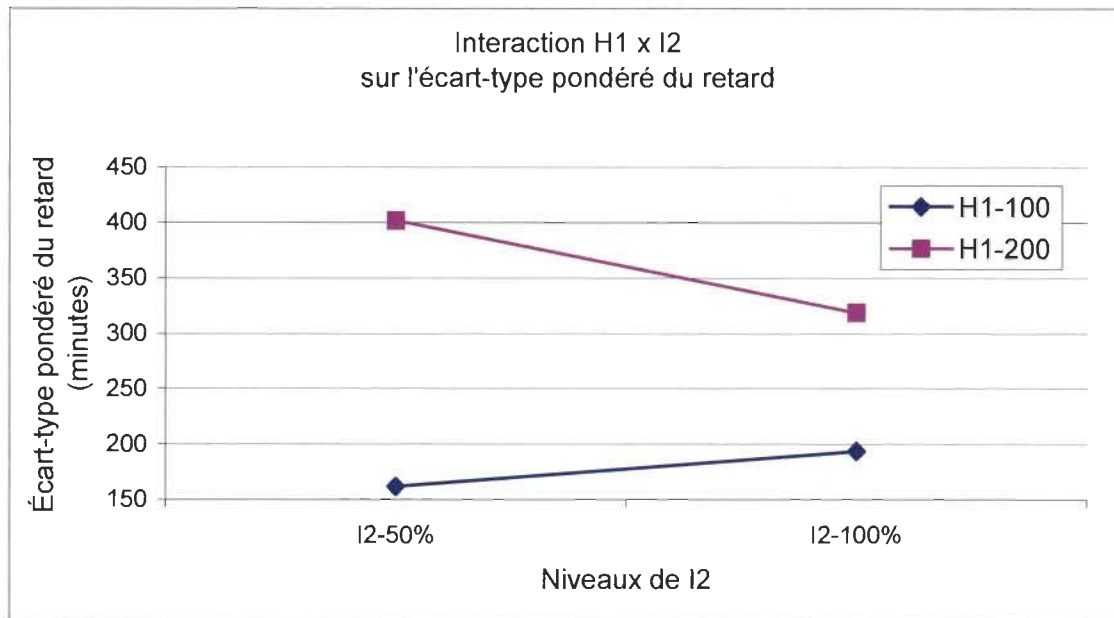


Figure 54. Interaction de la taille des commandes (H1) et de l'étendue des cycles de vie (I2)

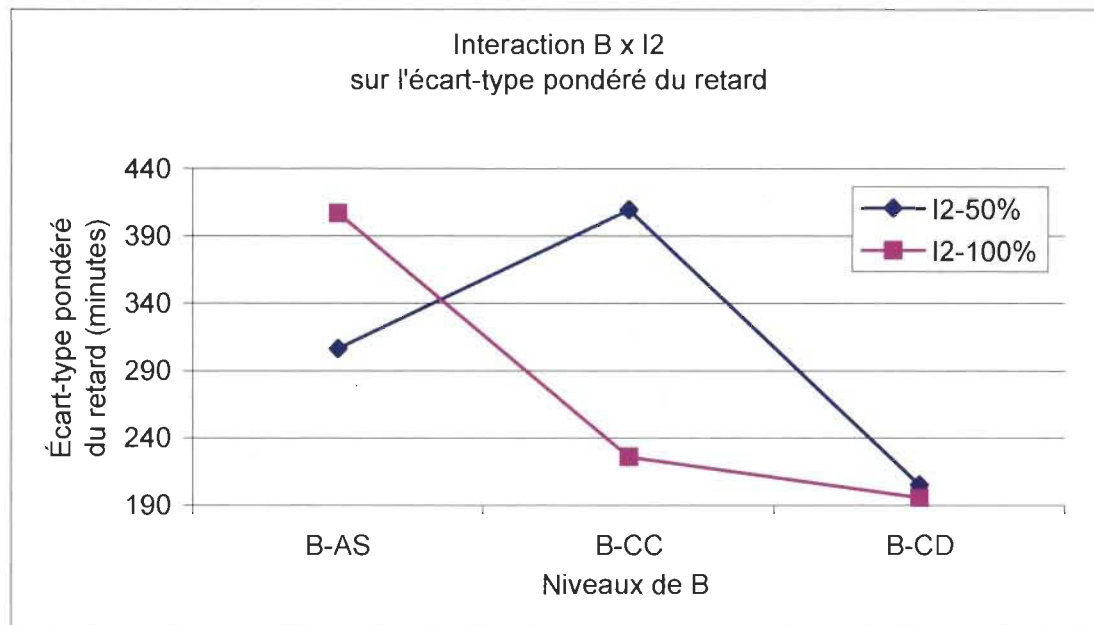


Figure 55. Interaction du système (B) et de l'étendue des durées des cycles de vie (I2)

## Retard maximal

Tableau 53  
Analyse de variance du retard maximal

Source	dl	SC	V	F	Fcrit.	P(F)	SC'	p%
Règle (A)	3	7,4E+09	2,5E+09	49,37	2,21	100,00%	7,3E+09	38,97%
Système (B)	2	1,7E+09	8,3E+08	16,60	2,43	100,00%	1,6E+09	8,38%
Calendrier (C)	1	8,9E+08	8,9E+08	17,71	2,82	99,99%	8,4E+08	4,49%
Hor.config. (D)	1	2,0E+08	2,0E+08	4,08	2,82	95,05%	1,5E+08	0,83%
Lot transfert (E)	1	1,9E+07	1,9E+07	0,38	2,82	46,11%	Rt. à l'erreur	
Nb. produits (F)	3	2,6E+09	8,7E+08	17,33	2,21	100,00%	2,5E+09	13,16%
Coût manutention (G)	1	3,3E+08	3,3E+08	6,62	2,82	98,65%	2,8E+08	1,51%
Taille commandes (H1)	1	1,2E+09	1,2E+09	24,20	2,82	100,00%	1,2E+09	6,23%
Étendue taille comm. (H2)	1	4,2E+06	4,2E+06	0,08	2,82	22,77%	Rt. à l'erreur	
Cycle de vie (I1)	1	7,7E+08	7,7E+08	15,35	2,82	99,97%	7,2E+08	3,85%
Étendue cycles (I2)	1	5,2E+06	5,2E+06	0,10	2,82	25,13%	Rt. à l'erreur	
Préavis (J1)	1	9,9E+08	9,9E+08	19,84	2,82	99,99%	9,4E+08	5,06%
Étendue préavis (J2)	1	3,6E+08	3,6E+08	7,24	2,82	99,00%	3,1E+08	1,68%
Erreur	44	2,2E+09	5,0E+07				3,0E+09	15,85%
Totale	59	1,9E+10					1,9E+10	100%

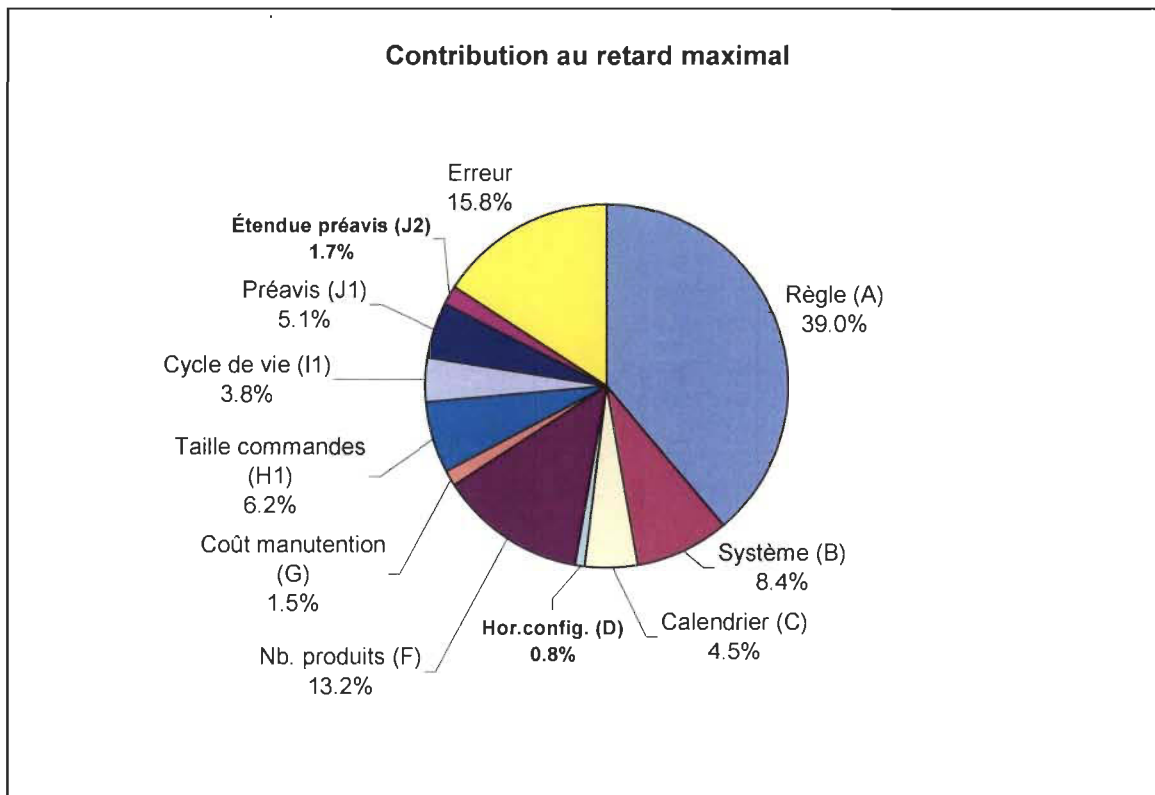


Figure 56. Contribution au retard maximal

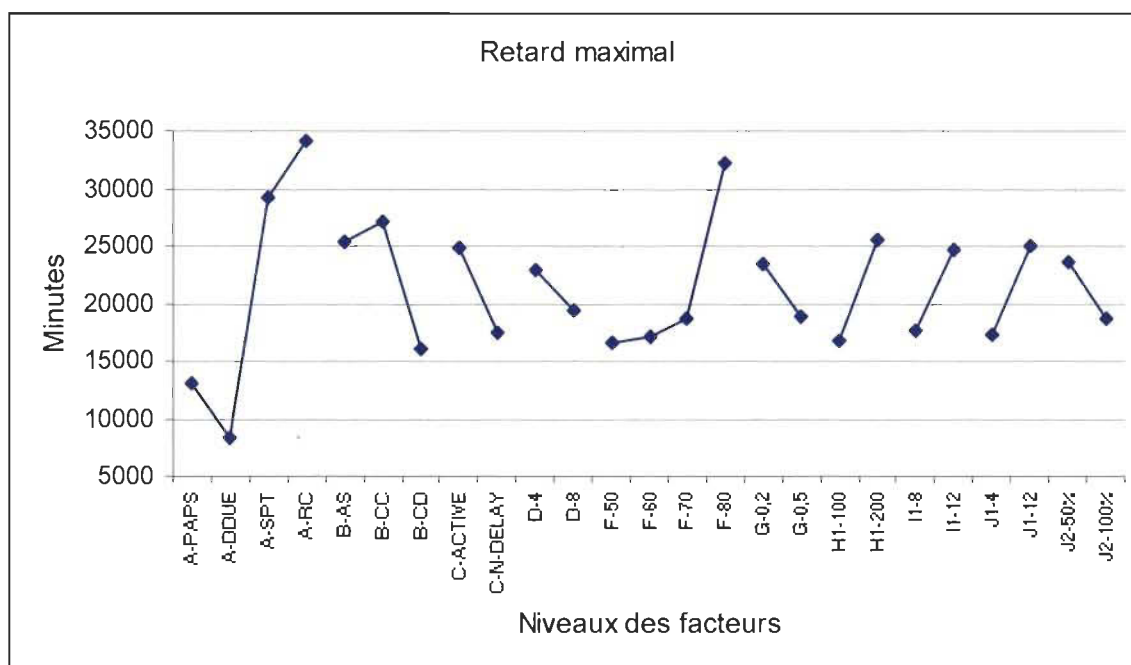


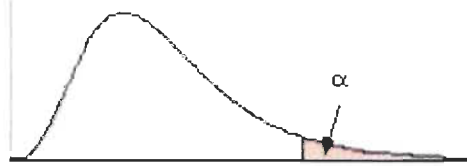
Figure 57. Effets significatifs sur le retard maximal

## ANNEXE H

Exemple de tables de Fisher-Snedecor



# Critical Values of the F Distribution at $\alpha = .05$



		Degrees of Freedom for Numerator											
		1	2	3	4	5	6	7	8	9	10	15	20
D e g r e e s o f F r e e d o m f o r D e n o m i n a t o r	1	161.4	199.5	215.7	224.6	230.2	234.0	236.8	238.9	240.5	241.9	246.0	248.0
	2	18.51	19.00	19.16	19.25	19.30	19.33	19.35	19.37	19.39	19.40	19.43	19.45
	3	10.13	9.55	9.28	9.12	9.01	8.94	8.89	8.85	8.81	8.79	8.70	8.66
	4	7.71	6.94	6.59	6.39	6.26	6.16	6.09	6.04	6.00	5.96	5.86	5.80
	5	6.61	5.79	5.41	5.19	5.05	4.95	4.88	4.82	4.77	4.74	4.62	4.56
	6	5.99	5.14	4.76	4.53	4.39	4.28	4.21	4.15	4.10	4.06	3.94	3.87
	7	5.59	4.74	4.35	4.12	3.97	3.87	3.79	3.73	3.68	3.64	3.51	3.44
	8	5.32	4.46	4.07	3.84	3.69	3.58	3.50	3.44	3.39	3.35	3.22	3.15
	9	5.12	4.26	3.86	3.63	3.48	3.37	3.29	3.23	3.18	3.14	3.01	2.94
	10	4.97	4.10	3.71	3.48	3.33	3.22	3.14	3.07	3.02	2.98	2.85	2.77
	11	4.84	3.98	3.59	3.36	3.20	3.10	3.01	2.95	2.90	2.85	2.72	2.65
	12	4.75	3.89	3.49	3.26	3.11	3.00	2.91	2.85	2.80	2.75	2.62	2.54
	13	4.67	3.81	3.41	3.18	3.03	2.92	2.83	2.77	2.71	2.67	2.53	2.46
	14	4.60	3.74	3.34	3.11	2.96	2.85	2.76	2.70	2.65	2.60	2.46	2.39
	15	4.54	3.68	3.29	3.06	2.90	2.79	2.71	2.64	2.59	2.54	2.40	2.33
	16	4.49	3.63	3.24	3.01	2.85	2.74	2.66	2.59	2.54	2.49	2.35	2.28
	17	4.45	3.59	3.20	2.97	2.81	2.70	2.61	2.55	2.49	2.45	2.31	2.23
	18	4.41	3.56	3.16	2.93	2.77	2.66	2.58	2.51	2.46	2.41	2.27	2.19
	19	4.38	3.52	3.13	2.90	2.74	2.63	2.54	2.48	2.42	2.38	2.23	2.16
	20	4.35	3.49	3.10	2.87	2.71	2.60	2.51	2.45	2.39	2.35	2.20	2.12
	22	4.30	3.44	3.05	2.82	2.66	2.55	2.46	2.40	2.34	2.30	2.15	2.07
	24	4.26	3.40	3.01	2.78	2.62	2.51	2.42	2.36	2.30	2.26	2.11	2.03
	26	4.23	3.37	2.98	2.74	2.59	2.47	2.39	2.32	2.27	2.22	2.07	1.99
	28	4.20	3.34	2.95	2.71	2.56	2.45	2.36	2.29	2.24	2.19	2.04	1.96
	30	4.17	3.32	2.92	2.69	2.53	2.42	2.33	2.27	2.21	2.17	2.02	1.93
	40	4.09	3.23	2.84	2.61	2.45	2.34	2.25	2.18	2.12	2.08	1.92	1.84
	50	4.03	3.18	2.79	2.56	2.40	2.29	2.20	2.13	2.07	2.03	1.87	1.78
	60	4.00	3.15	2.76	2.53	2.37	2.25	2.17	2.10	2.04	1.99	1.84	1.75
	120	3.92	3.07	2.68	2.45	2.29	2.18	2.09	2.02	1.96	1.91	1.75	1.66
	inf	3.84	3.00	2.60	2.37	2.21	2.10	2.01	1.94	1.88	1.83	1.67	1.57